

Titre: Étude statistique de profils de corrosion appliquée à l'inspection
Title: non-destructive de conduites métalliques

Auteur: Frédéric Bourgeois
Author:

Date: 2005

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bourgeois, F. (2005). Étude statistique de profils de corrosion appliquée à
Citation: l'inspection non-destructive de conduites métalliques [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7594/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7594/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE STATISTIQUE DE PROFILS DE CORROSION APPLIQUÉE À
L'INSPECTION NON-DESTRUCTIVE DE CONDUITES
MÉTALLIQUES

FRÉDÉRIC BOURGEOIS
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉTALLURGIQUE)
DÉCEMBRE 2005

© Frédéric Bourgeois, 2005.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-16760-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-16760-1

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE STATISTIQUE DE PROFILS DE CORROSION APPLIQUÉE À
L'INSPECTION NON-DESTRUCTIVE DE CONDUITES
MÉTALLIQUES

Présenté par : BOURGEOIS Frédéric

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

Mme YACOUT Soumaya, Ph.D., présidente

M. TURENNE Sylvain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CLÉMENT Bernard, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. DUBÉ Yves, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de recherche, monsieur Sylvain Turenne, madame Myriam Brochu et monsieur Bernard Clément, pour les judicieux conseils qu'ils ont su prodiguer tout au long de ma maîtrise. Ce travail n'aurait pu être réalisé sans leur appui.

Je ne peux pas non plus passer sous silence la contribution des nombreux employés de la compagnie X-Per-X. Je tiens donc à remercier François Leduc et Normand Jacques pour leurs conseils et le travail qu'ils ont réalisé dans le cadre du design et de la fabrication des nombreuses pièces requises pour réaliser ce travail. Je veux aussi remercier Gérard Landry, Benoît Godin, Douglas Hanna, Yvan Hubert, Patrick Beck et Frédéric Lefebvre pour leur contribution au développement des nombreux protocoles d'essais en laboratoire et leurs conseils quant à l'orientation du projet. Finalement, je désire remercier toute l'équipe de techniciens en radiographie de X-Per-X soit Dave Walmsley, Nedir Nour Edine, Barry Morris et Gary Guidry, qui m'ont introduit au monde de la radiographie industrielle et qui ont réalisé toutes les radiographies analysées dans ce travail.

Je tiens finalement à remercier le CRSNG pour le support financier qui a été nécessaire à la réalisation de ce projet.

RÉSUMÉ

L'évaluation adéquate de l'état de conduites industrielles en service a toujours représenté un défi de taille. Le travail présenté dans ce document fait parti d'un projet entrepris par la compagnie X-Per-X qui vise à pallier les lacunes des méthodes d'inspections non-destructives classiques. Pour ce faire, cette entreprise a débuté il y a quelques années la programmation d'un logiciel baptisé « Corroplus ». La méthode initialement proposée par X-Per-X consiste à baser la classification de l'état de conduites sur des indices de sévérité de la corrosion. Le but à atteindre dans le cadre du développement de ce logiciel est d'identifier des informations, provenant d'inspections non-destructives d'installations en service, qui peuvent être utilisés afin de calculer de tels indices.

Les techniques proposées dans ce travail se basent sur l'analyse de radiographies de conduites. Celles-ci permettent un calcul adéquat de l'indice de sévérité de par la grande quantité d'informations qu'elles contiennent. Notons que le logiciel possède déjà la capacité d'effectuer des mesures d'épaisseurs au niveau des parois visibles sur des radiographies. Ces mesures pourraient être utilisées afin de générer des distributions statistiques permettant le calcul de probabilité de bris ou, plus simplement, la probabilité d'avoir une paroi plus mince qu'un seuil donné. Toutefois, la connaissance des mécanismes de corrosion facilite énormément l'application de modèles statistiques appropriés. En effet, il n'est pas rare de retrouver plusieurs mécanismes de corrosion en cours dans une même conduite, ce qui peut rendre très difficile la reconnaissance à l'aide de mesures d'épaisseurs. Ce travail se concentre donc sur l'élaboration de méthodes permettant la reconnaissance numérique de mécanismes de corrosion à partir de fonds de conduites radiographiées (information visible entre les deux parois).

Le développement d'une telle technique présente de nombreux avantages. Premièrement, aucune méthode non-destructive ne permet, jusqu'à maintenant, la reconnaissance des mécanismes de corrosion. Mieux connaître les processus de

dégradation en cours dans une installation va sans aucun doute permettre aux industriels de prendre des décisions de maintenance beaucoup plus justes. Deuxièmement, les fonds d'images peuvent aussi être utilisés afin d'obtenir des mesures d'épaisseurs résiduelles. Finalement, des données numériques peuvent être analysées automatiquement, diminuant ainsi le temps que les opérateurs allouent normalement à ce travail.

Pour analyser les fonds d'images, ce travail propose l'utilisation de résidus de modèles de régression de degré 4. Ceux-ci éliminent les effets de nombreuses variables indésirables tels que tous les paramètres reliés au positionnement de la source. Ils permettent donc l'emploi de techniques de radiographie classiques. L'analyse de résidus fait aussi très bien ressortir l'effet de la corrosion. Cette variable explique en effet à elle seule 79% de la variabilité retrouvée au niveau de conduites dont l'état diffère. L'utilisation d'une telle technique se révèle donc être une piste prometteuse. Notons que toutes les analyses faites dans ce travail ont été réalisées en laboratoire.

Néanmoins, les modèles polynomiaux d'ordre 4 ne parviennent pas à représenter parfaitement les données de fonds d'images. Ces derniers modélisent mal les données provenant des zones adjacentes aux parois et celles du centre des conduites. Ces erreurs de modélisation rendent la détection de la corrosion trop peu sensible. Ces modèles parviennent donc mal à discerner des mécanismes trop ressemblants. De plus, leurs résultats sont influencés par certains paramètres géométriques tels que le diamètre des conduites et l'épaisseur des parois. Finalement, des modèles de degré 4 s'avèrent trop peu précis pour réaliser des mesures d'épaisseurs au niveau des fonds d'images.

Heureusement, les modèles proposés dans ce rapport peuvent être améliorés de plusieurs manières. Ce travail donne une possibilité basée sur les techniques de krigeage et de modélisation de résidus par splines linéaires. En somme, les techniques proposées dans ce travail peuvent constituer une base solide pour le développement de techniques de reconnaissance automatique de la corrosion. Ils nécessitent toutefois de légères améliorations afin d'être intégrées à un logiciel à vocation industrielle.

ABSTRACT

In-service evaluation of industrial piping networks has always been a challenge for maintenance departments all around the world. The work presented in this document is part of a project that was initiated by X-Per-X, a company working in the Non-Destructive testing field. The main goal of this project is to resolve the shortcomings related to classic non-destructive inspection techniques. In order to do so, X-Per-X has initiated a project named “Corroplus”, which requires the programming of a tool that will collect and analyse inspection data. In order to provide a protocol that can be easily used by industrials, X-Per-X has proposed to calculate corrosion severity indexes. These severity indexes could be calculated for various pipes in an industrial piping network. It could then be utilized to classify pipes according to their degradation.

The main goal of this master degree project is to propose a protocol that can be followed in order to obtain the corrosion severity index for a given pipe. Because it can generate a lot of useful (and still unused) information, radiography is going to be the non-destructive technique that will be mainly analysed in this work. It is important to note that Corroplus already has the capacity to calculate remaining wall thicknesses from radiographed pipes. This kind of data could be utilized to obtain various fracture probabilities or, more simply, to calculate the risk of having thinner walls compared to an expected threshold. Unfortunately, it can be very hard to associate measured wall thicknesses to a known probability distribution function since there can be more than one active corrosion mechanisms at the same time in a pipe. It is thus important to know which corrosion mechanism is taking place in a given pipe before trying to analyse it. In order to do so, the analysis of the area “in-between” the walls, called the background, on a radiographed pipe is taken into consideration since it contains all the information regarding active corrosion mechanisms. Thus, this work is focusing on the elaboration of mathematical methods that could be applied to the background area in order to recognize corrosion mechanisms.

A proper analysis of radiograph's background could not only help the calculation of corrosion severity indexes, it could also be utilized to produce other useful outputs. Firstly, there is currently no non-destructive procedure that can give information regarding active corrosion mechanisms in a pipe. Knowing such information could greatly help maintenance departments to make appropriate decisions regarding their pipe networks. Secondly, background information could be analysed and converted into thickness measurements. Those analyses could produce a vast quantity of thickness measurements and could also help measure small corroded area affected by mechanisms such as pitting which are difficult to spot on radiographed walls. Finally, it could also help the programming of an automatic image analysis protocol that would significantly reduce the time spent on data analysis.

In order to analyse background data, this work proposes to use residuals from polynomial models (4th order). The mean sum of square of residuals has been measured for many corroded and uncorroded radiographed pipes. The corrosion in the pipes was generated in a laboratory with the use of proper acids. The experiments carried out in this work have all been planned with statistical design of experiments techniques. The results are very promising since the corrosion represents 79% of the variation observed in the mean sum of square of residuals. Analysing background with residuals also eliminates the effect of variables such as the position of the source above the radiographed pipe. This means that the analysis protocol suggested in this paper can easily be adapted to classic radiographic analysis since it is very hard for technicians to precisely set the source above the pipe and the film.

Unfortunately, the background characterization protocol presented in this paper has a few drawbacks. Firstly, the polynomial models are not representing the observed data near the walls and in the center part of radiographs adequately. This behaviour generates patterns in the residual data that make their analysis less precise. The models

are also influenced by geometrical parameters such as pipe diameter and wall thickness as well as the overall radiograph density. Finally, because of those problems, the background analysis is too imprecise to differentiate resembling corrosion mechanisms.

Nevertheless, this work proposes many possible ways to correct imprecision generated by the use of polynomial models. Kriging techniques can be utilized on residuals to obtain and reapply a better background model. This model could be obtained with the use of splines (linear). All things considered, the protocols presented in this work are very promising, but they still require to be optimized in order to be integrated in a software targeted for industrial needs.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VIII
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES ANNEXES.....	XVIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
 1 INTRODUCTION	 1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Buts et objectifs du projet.....	2
1.3 Principales étapes de réalisation	6
1.3.1 La génération de données.....	6
1.3.2 Études préliminaires de fonds de radiographies.....	7
1.3.3 Étude statistique	7
 2 REVUE THÉORIQUE.....	 9
2.1 Designs et analyses statistiques d'expériences.....	10
2.2 La corrosion	11
2.2.1 Concepts de base de la corrosion en milieu aqueux.....	12
2.2.2 Principaux mécanismes de corrosion	16
2.3 La radiographie industrielle	19
2.3.1 Concepts de base de radiographie industrielle	20
2.3.2 Application des principes théoriques de la radiographie	25
2.3.3 Principales sources d'imprécisions	28
2.3.4 Normes employées en radiographie industrielle	29

3	REVUE DE LITTÉRATURE	31
3.1	Modèles probabilistes d'analyses de la corrosion	32
3.2	Application de l'électrochimie à la corrosion	45
3.3	L'analyse numérique de radiographies industrielles.....	48
4	RETOUR SUR LA THÉORIE.....	50
5	ESSAIS DE CORROSION	52
5.1	Essais préliminaires réalisés à l'aide d'acide sulfurique.....	53
5.1.1	Méthodologie expérimentale.....	53
5.1.2	Résultats des essais	56
5.2	Essais préliminaires basés sur l'utilisation de chlorures	62
5.2.1	Méthodologie expérimentale.....	62
5.2.2	Résultats des essais	63
5.3	Essais réalisés sur des sections complètes de tuyaux	65
5.3.1	Méthodologie expérimentale.....	66
5.3.2	Résultats des essais	67
5.4	Protocole d'essais de corrosion final.....	70
5.4.1	Méthodologie expérimentale.....	70
5.4.2	Résultats des essais	72
6	ÉTUDE DE RADIOGRAPHIES DE CONDUITES	75
6.1	Étude de fonds d'images de conduites corrodées.....	75
6.1.1	Méthodologie expérimentale.....	76
6.1.2	Résultats des essais	78
6.2	Étude de modèles théoriques de conduites radiographiées	85
6.2.1	Modélisations des épaisseurs traversées, coupe radiale.....	85
6.2.2	Modélisations des épaisseurs traversées, coupe longitudinale.....	90
6.2.3	Modèles de régression de fonds d'images radiographiques.....	93
6.3	Résumé des calculs.....	102
7	ÉTUDE STATISTIQUE DU MODÈLE DE FONDS	103
7.1	Méthodologie expérimentale.....	103

7.1.1	Le design d'expérience	104
7.1.2	Paramètres de radiographie	110
7.1.3	Numérisation et traitement des films digitalisés	113
7.1.4	Traitements des données et calcul des MSE	114
7.2	Résultats des essais.....	117
7.2.1	Analyses directes du design	118
7.2.2	Analyses des effets par modèle de régression.....	121
7.2.3	Analyse de variance à l'aide d'un modèle de régression	126
7.2.4	Analyse de l'effet de la position de prise de données	129
7.2.5	Analyse de l'effet matrice	132
7.2.6	Analyse de la provenance de l'effet matrice	134
7.2.7	Autres effets de noircissement et amélioration du modèle	140
7.3	Retour sur les résultats et recommandations	145
7.4	Exemples d'applications	148
7.4.1	Cas des conduites industrielles.....	149
7.4.2	Analyse d'une conduite à forte paroi	152
7.4.3	Cas de corrosion localisée.....	153
8	CONCLUSION	156
9	BIBLIOGRAPHIE	158

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Table de classification électrochimique des éléments	13
Tableau 5.1 : Caractéristiques des échantillons du deuxième essai	56
Tableau 5.2 : Caractéristiques des échantillons exposés à la solution 30% vol.....	57
Tableau 5.3 : Caractéristiques des échantillons exposés à la solution 15% vol.....	58
Tableau 5.4 : Données relatives à la Figure 5.4	60
Tableau 5.5 : Données relatives à la figure 5.5	60
Tableau 5.6 : Paramètres d'essais de corrosion par piqûres.....	63
Tableau 5.7 : Pertes d'épaisseur au niveau de la conduite exposée à H ₂ SO ₄ 50%	69
Tableau 5.8 : Composition en chrome dans l'alliage et dans la solution acide	74
Tableau 6.1 : Analyse de variance relié au modèle de fond d'image	80
Tableau 6.2 : Analyses de fonds d'images basées sur des sommes de carrés de résidus.	83
Tableau 6.3 : Caractéristiques de la source d'iridium 192 simulée	95
Tableau 6.4 : Analyse de variance du modèle de densité	101
Tableau 7.1 : Variables à analyser lors du design d'expérience	105
Tableau 7.2 Matrice des 18 essais randomisés.....	108
Tableau 7.3 : Ordre des essais par rapport à la matrice A.....	109
Tableau 7.4 Données relatives aux sources employées	111
Tableau 7.5 : Analyse de variance des résultats directs du design.....	120
Tableau 7.6 : Analyse de variance du modèle de régression	122
Tableau 7.7 : Modèle de régression mixte pour éliminer l'effet de la variance.....	127
Tableau 7.8 : Résultat de l'analyse de la variance	127
Tableau 7.9 : Analyse ANOVA de l'effet position.....	130
Tableau 7.10 Analyse de variance du modèle Anova.....	134
Tableau 7.11 : Analyse de variance du modèle Anova des luminances	137
Tableau 7.12 : Tableau d'analyse de la variance du temps de radiographie.....	140

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Délimitation des zones observables sur un tuyau radiographié.....	4
Figure 2.1 : Courbe anodique.....	16
Figure 2.2 : Comportement actif.....	16
Figure 2.3 : Comportement passif.....	16
Figure 2.4 : Comportement instable.....	16
Figure 2.5 : B en fonction de l'épaisseur traversée et de μ	24
Figure 2.6 : B en fonction de l'épaisseur traversée	24
Figure 2.7 : Courbes d'exposition de Hürter-Driffeld	27
Figure 2.8 : Phénomène de flou géométrique	29
Figure 3.1 : Représentation de l'utilisation de la loi normale	33
Figure 3.2 : Évolution de la corrosion représentée à l'aide de lois normales	36
Figure 5.1 : Disposition schématisée des échantillons lors des essais	55
Figure 5.2 : Comparaison entre deux échantillons des essais à 15 et 30% vol.....	57
Figure 5.3 : Meilleur résultat de l'essai de corrosion aux soudures.....	59
Figure 5.4 : Perte de poids des échantillons exposés à la solution 25% vol	59
Figure 5.5 : Taux de corrosion des échantillons exposés à la solution 25% vol	60
Figure 5.6 : Meilleurs résultats obtenus des essais de corrosion par piqûres.....	64
Figure 5.7 : Simulation de la corrosion par piqûres	65
Figure 5.8 : Montage initial de corrosion généralisée accélérée	67
Figure 5.9 : Radiographies de tuyaux exposés à l'acide sulfurique 50%.....	69
Figure 5.10 : Montages d'essais finaux.....	71
Figure 5.11 : Pic de chrome observé avant le début de l'attaque rapide de l'acier.....	73
Figure 6.1 : Modélisation de fonds d'images radiographiées et digitalisée	79
Figure 6.2 : Résidus normalisés de modèles de fonds d'images corrodées	81
Figure 6.3 : Analyse de normalité du modèle de fonds de radiographies	81
Figure 6.4 : Échantillon T2-F50-0°-A#1-I#2	84
Figure 6.5 : Système de modélisation bidimensionnelle de radiographie de conduites...	86

Figure 6.6 : Épaisseurs traversées dans la pièce en fonction de la position sur le film ...	88
Figure 6.7 : Délimitation des parois d'un tuyau radiographié	88
Figure 6.8 : Variation de la résolution en fonction de la position dans le tuyau.....	90
Figure 6.9 : Modélisation des épaisseurs traversées dans le sens longitudinal.....	91
Figure 6.10 : Épaisseurs traversées dans le sens longitudinal du tuyau.....	93
Figure 6.11 : Distances considérées dans le calcul et simplifications géométriques	97
Figure 6.12 : Modélisation des densités radiographiques théoriques	98
Figure 6.13 : Modélisations de la zone de faible densité	99
Figure 6.14 : Modélisation des densités radiographiques corrigées	100
Figure 6.15 : Résidus d'un modèle polynomial d'ordre 4 des densités corrigées.....	101
Figure 7.1 : Montage expérimental	112
Figure 7.2 : IQI à fil	113
Figure 7.3 : Délimitation des parois d'un tuyau radiographié	115
Figure 7.4 : Analyse graphique du rapport signal sur bruit.....	119
Figure 7.5 : Carte de contrôle \bar{x} -bar et s.....	121
Figure 7.6 : Distributions de résidus normalisés sans logarithme.....	123
Figure 7.7 : Distributions de résidus normalisés avec logarithme	124
Figure 7.8 : Diagramme normale-quantile	124
Figure 7.9 : Résidus studentisés en fonction des résidus studentisés supprimés	125
Figure 7.10 : Carte de contrôle des trois matrices.....	128
Figure 7.11 : Résultats graphiques de l'analyse ANOVA sur l'effet position.....	130
Figure 7.12 : Résultats graphiques de l'analyse Anova	133
Figure 7.13 : Comparaison entre des images équivalentes des matrices A et C.....	135
Figure 7.14 : Diagramme de Tukey des données de luminances.....	136
Figure 7.15 : Résultats graphiques de l'analyse Anova sur les luminances.....	137
Figure 7.16 : Différences entre les courbes des matrices C et A.....	138
Figure 7.17 : Différences au niveau des résidus de MC7 et MA3	139
Figure 7.18 : Résultats graphiques de l'analyse Anova sur les luminances.....	140
Figure 7.19 : Résidus de deux structures présentant de la corrosion localisée	142

Figure 7.20 : Identification et élimination des défauts.....	144
Figure 7.21 : Utilisation de splines linéaires.....	145
Figure 7.22 : Conduites corrodées d'Alcan.....	150
Figure 7.23 : Graphiques de résidus en fonction de la position.....	151
Figure 7.24 : Radiographie d'une conduite à forte paroi et de faible diamètre	152
Figure 7.25 : Résidus d'une conduite à forte paroi et faible diamètre	152
Figure 7.26 : Radiographie de corrosion localisée par abrasion	154
Figure 7.27 : Résidus de corrosion localisée par abrasion.....	154

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Vision globale du logiciel.....	169
ANNEXE 2 : Délimitations des zones d'une radiographie de section droite	170
ANNEXE 3 : Échantillons exposés à l'acide sulfurique 15 et 30% volumique	171
ANNEXE 4 : Échantillons exposés à l'acide sulfurique 25% volumique	173
ANNEXE 5 : Échantillons exposés aux diverses solutions contenant des chlorures ...	175
ANNEXE 6 : Tuyaux exposés 56 jours à l'acide sulfurique 50% volumique	177
ANNEXE 7 : Trois radiographies analysées.....	178
ANNEXE 8 : Résultats des essais du DOE.....	179
ANNEXE 9 : Données de luminances	181
ANNEXE 10 : Schéma d'une méthodologie idéale.....	182

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ANOVA : Analysis of variance (Analyse de variance)

Courbe HD : Courbe de Hürter-Driffield

DOE : Design of Experiments (Design d'expérience)

ENH : Électrode Normale à Hydrogène

IQI : Indicateur de qualité d'image

MSE : Mean sum of square of residuals (somme de carrés moyenne des résidus)

NDT : Non-Destructive Testing (Essai non destructif)

VIF : Variance Inflation Factor

Vol : Volumique, se réfère à une concentration

ZAT : Zone Affectée Thermiquement

1 INTRODUCTION

Les industriels d'aujourd'hui doivent faire face à une foule de contraintes de production serrées tout en ayant à travailler avec des conditions d'opération exigeantes et, dans certains cas, avec des équipements vieillissants. Dans un tel contexte, les techniques de maintenance prédictives et préventives peuvent grandement contribuer à conserver une cadence de production optimale tout en assurant des coûts de maintenance faibles. Cependant, ces techniques requièrent un suivi des installations et l'acquisition précise de données. Un signal adéquat doit donc être mesuré afin de représenter fidèlement l'état d'une structure analysée. Pour remplir cette nécessité, un important éventail de techniques d'évaluation non destructives est mis à la disposition des ingénieurs et industriels responsables d'équipements en service. Toutefois, certaines limitations et problématiques sont associées à l'utilisation de telles techniques. En effet, ces dernières permettent difficilement l'obtention d'information globale concernant une installation inspectée. En bref, il est impossible, à l'aide de ces méthodes, d'inspecter une installation au complet et les données que ces dernières fournissent peuvent parfois être peu utiles afin d'effectuer des analyses précises sur l'état d'une installation.

1.1 Problématique

C'est précisément ce problème qui est retrouvé lors d'analyses de corrosion de conduites en service par méthodes non destructives. Dans le cadre de ces campagnes d'inspections, il n'est pas rare de n'avoir aucune information concernant les mécanismes de dégradation en cours et de baser des prises de décisions sur une petite quantité de mesures d'épaisseurs résiduelles de paroi. Les stratégies de maintenance sont donc souvent basées sur un faible flot d'informations. De telles méthodes ne facilitent donc pas la prise de décision et peuvent être à la base de coûts de maintenance non optimaux. Il ne faut pas non plus passer sous silence le temps requis pour l'analyse de données qui

peut grandement solliciter tout un département d'ingénierie. Il est donc nécessaire de développer des outils qui permettent un meilleur diagnostic des installations tout en facilitant la phase d'étude des résultats.

Fort heureusement, il est possible de développer de nouveaux outils d'analyses efficaces, basés sur les méthodes d'inspection non destructives classiques. Tel est le principal objectif visé dans le cadre du développement du logiciel « Corroplus », proposé par la compagnie X-Per-X. Le but de celui-ci est d'effectuer une quantification de l'état de conduites en service par l'utilisation d'indices de sévérité de la corrosion. Ce type de quantification aurait pour avantage d'être simple et rapide à analyser, car les premières phases de prise de décisions ne seraient basées que sur une seule donnée. Cependant, un tel indice doit être généré à partir des nombreuses caractéristiques provenant des installations inspectées. Le but de ce projet de maîtrise réside donc dans l'identification et le développement de techniques de mesure de telles caractéristiques.

Comme le développement du logiciel Corroplus a débuté en 2002, ce dernier possède déjà certaines fonctionnalités. Il peut, en effet, effectuer la mesure d'épaisseurs de conduites droites à partir des parois visibles sur des radiographies (Naud, Chalifour, Dubé et Brochu, 2004). D'autres régions visibles sur une radiographie pourraient donc être considérées afin d'amasser des données pour l'évaluation d'un indice de sévérité. Il serait aussi possible d'inclure des mesures provenant d'autres techniques d'inspections non destructives, tels les ultrasons, afin d'évaluer l'indice.

1.2 Buts et objectifs du projet

Tel que mentionné précédemment, le projet vise principalement à améliorer l'analyse et l'interprétation de données provenant d'inspections non destructives de conduites en service par l'utilisation d'indice de sévérité de la corrosion. Le projet entrepris n'a toutefois pas pour but de déterminer la sévérité elle-même, mais de fournir

une importante quantité d'informations utiles à son calcul. Pour ce faire, deux types de mesures sont ici considérés soit : les épaisseurs résiduelles de parois et les mécanismes de corrosion en cours dans les conduites. Le raisonnement guidant ce choix est simple et l'exemple qui suit l'illustre. En effet, il est naturel de penser qu'une paroi ayant une épaisseur s'approchant de la taille critique, spécifiée par les normes ou par un utilisateur, constitue un cas de corrosion sévère. Une conduite dont l'épaisseur de paroi est maximale et dont la corrosion évolue lentement n'est toutefois qu'un cas de corrosion peu sévère et qui demande un faible niveau de suivi. En somme, il est nécessaire de pouvoir effectuer des mesures d'épaisseurs ainsi qu'un suivi de l'évolution des pertes de matière dans le temps afin d'évaluer l'indice de sévérité de la corrosion. Ce type de mesure contient donc deux données utiles au calcul de la sévérité. En second lieu, les types de mécanismes de dégradation eux-mêmes doivent être pris en considération. En effet, la corrosion par piqûres est plus difficile à repérer et progresse parfois de manière imprévisible. Elle est donc plus sévère et demande un suivi plus serré. En bref, le calcul de l'indice de sévérité s'effectuerait à partir de trois caractéristiques dont deux sont reliées à la mesure d'épaisseurs résiduelles soit : le mécanisme de corrosion en cours, l'épaisseur résiduelle des parois des conduites ainsi que l'évolution de la taille des parois dans le temps.

Tel que mentionné précédemment, le logiciel Corroplus possède la capacité d'effectuer des mesures d'épaisseurs à partir des parois visibles sur des radiographies. Cependant, il est difficile de repérer la présence de piqûres de corrosion (ou autres mécanismes de corrosion très localisés) sur ces dernières. De plus, se baser uniquement sur des mesures d'épaisseurs peut rendre difficile la caractérisation et la classification des mécanismes de corrosion. Il est donc nécessaire d'obtenir une quantité supplémentaire d'information. Le fond des radiographies, qui est la zone située entre les deux parois (voir figure 1.1), est donc étudié dans ce travail afin d'obtenir des données relatives aux divers mécanismes de corrosion et aux épaisseurs résiduelles.

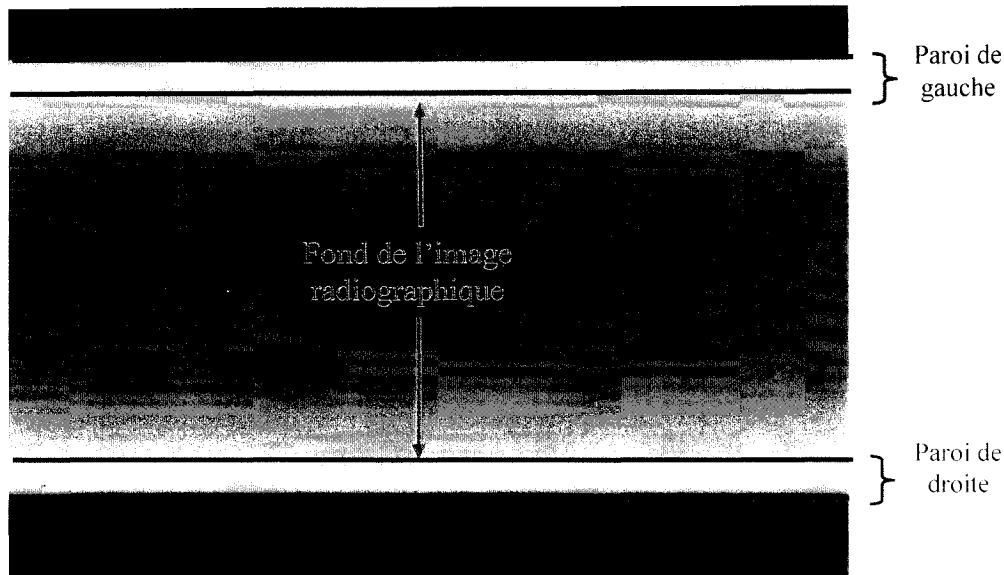


Figure 1.1 : Délimitation des zones observables sur un tuyau radiographié

En effet, les fonds d'images radiographiques possèdent une grande quantité d'information relative aux morphologies générées par les divers mécanismes de corrosion. Cette affirmation est appuyée par le fait que les techniciens se basent souvent sur cette zone pour juger de la présence de piqûres de corrosion. Ces derniers posent d'ailleurs plusieurs conclusions relatives à l'état de conduites suite à l'observation des fonds de radiographies. Toutefois, aucune approche numérique n'a encore été présentée pour en faire autant malgré le fait que leur quantification pourrait permettre le développement de puissantes méthodes de classement des conduites. De plus, l'utilisation de mesures de parois, couplée aux mesures de fonds, pourrait probablement être à la base de méthodes de génération de profils d'épaisseurs s'appliquant à toute une surface radiographiée. Le schéma présenté en annexe 1 illustre bien les diverses étapes d'analyse que pourrait suivre Corroplus. Ce schéma permet aussi de mieux situer les mesures de fonds d'images dans l'évaluation et l'utilisation des indices de sévérité. Les techniques d'inspections par radiographies constitueraient donc le cœur de Corroplus et les données servant à évaluer la sévérité de la corrosion seraient puisées dans les radiographies numérisées. L'indice de sévérité serait ensuite employé afin de juger du degré de suivi nécessaire. Par exemple, un tuyau présentant uniquement de la corrosion

généralisée pourrait, lors de futures campagnes d'inspections, être uniquement étudié à l'aide d'ultrasons.

Le but du logiciel Corroplus est de permettre une quantification plus précise de conduites corrodées. Cependant, celui-ci pourrait aussi offrir une grande gamme d'avantages supplémentaires. Premièrement, la phase d'analyse et de classement des radiographies pourrait être effectuée de manière automatique, ce qui minimiserait l'intervention humaine dans l'étude des résultats. De plus, la connaissance précise de l'état d'une installation donnée permettrait de juger du temps requis pour son inspection et d'envoyer l'équipe adéquate pour effectuer le travail. Ainsi, Corroplus pourrait intervenir au niveau de la gestion du personnel d'inspection et de la répartition des ressources humaines.

En somme, grâce à un protocole d'analyse de fonds de radiographies, Corroplus pourrait permettre de connaître très exactement l'état de conduites en service à l'aide d'un indice de sévérité et de l'évolution de cet indice. Cette technologie pourrait aussi être intégrée à des méthodes de suivi moins coûteuses et plus rapides tel que les ultrasons. Il est donc possible d'affirmer que le développement de techniques de mesures de fonds d'images radiographiques pourrait constituer une innovation des plus intéressante et une base solide pour le logiciel Corroplus. Rappelons ici que le projet entrepris vise principalement à développer une méthode de classement fonctionnelle et non à étudier les divers critères de classements des mécanismes de corrosion. Ces méthodes de classements et d'analyses de fonds radiographiques sont aussi basées sur des techniques d'inspections classiques. Aucune modification ne devrait donc être proposée quant aux méthodes d'acquisition de données en chantier. La section qui suit présente, avec plus de détails, les diverses étapes de réalisation du projet.

1.3 Principales étapes de réalisation

Cette section résume les principaux protocoles expérimentaux employés tout au long de ce travail. Mise à part la revue de l'état de l'art (sections 2 et 3), le projet est subdivisé en trois principales catégories qui touchent respectivement les techniques de génération de données, des études préliminaires de fonds radiographiques et une étude statistique d'un protocole d'analyse de fonds d'images. En bref, le but de la présente section est de mentionner les principaux éléments qui concernent les diverses étapes à venir dans ce projet. Cette section permet donc d'établir une idée claire de la direction que prend ce travail.

1.3.1 La génération de données

Il existe deux grandes catégories de moyens permettant de générer des données expérimentales soit les simulations Monte-Carlo et les essais en laboratoire. Les sections 2 et 3 montrent que la littérature scientifique actuelle est insuffisante pour permettre d'employer des modèles Monte-Carlo afin de simuler des données à étudier. Des essais en laboratoire sont donc considérés et leur développement est présenté à la section 5 de ce rapport. Le but de ces derniers est de produire des structures corrodées de manière accélérée dans de petites conduites manipulables en laboratoire. Ces essais permettent donc d'approcher les cas industriels tout en étant à l'échelle du laboratoire.

1.3.2 Études préliminaires de fonds de radiographies

Cette section comporte deux types d'études soit l'analyse de fonds réels et l'examen de modèle mathématiques. Ces éléments permettent de mieux comprendre les phénomènes reliés à la radiographie de conduites ainsi que d'identifier un signal adéquat à mesurer au niveau des fonds d'images. Plus précisément, c'est à cette section que l'on retrouve les premières analyses de fonds d'images qui permettent une classification des mécanismes de corrosion. De plus, trois modèles sont analysés. Les deux premiers portent sur l'étude des épaisseurs traversées par un rayonnement gamma (provenant de la source radioactive qui permet la radiographie) dans une coupe longitudinale et radiale d'une conduite. Ces données sont ensuite employées pour créer un modèle de densité radiographique en fonction de la position sur un film. En d'autres termes, les modèles générés à cette section permettent de bien comprendre l'effet de noircissement de films lors de radiographies. Toutes les données concernant ces essais sont retrouvées à la section 6 de ce document.

1.3.3 Étude statistique

La dernière section expérimentale de ce rapport concerne une étude du comportement du modèle de fond identifié à la section 6. Cette étude a pour but d'identifier les divers paramètres qui influencent le modèle. Le but de ce projet est d'arriver à fournir les premières bases d'un modèle de classement de mécanismes de corrosion à partir de fonds d'images. Tel que mentionné précédemment, cette classification va permettre un calcul d'indice de sévérité de la corrosion. Pour ce faire, le modèle d'analyse de fonds d'images ne doit être influencé que par la corrosion (ou d'autres variables contrôlables). Si trop de variables influencent les résultats du modèle, la classification va être erronée et les indices de sévérité ne vont pas représenter l'état

réel des conduites radiographiées. Cette section permet donc de bien analyser les avantages et limitations du modèle de fonds présenté à la section 6. Elle comporte aussi plusieurs suggestions utiles à considérer pour la réalisation de travaux futurs. Toutes les données concernant ces essais figurent à la section 7 de ce rapport.

Maintenant que les principales étapes de recherche de ce travail ont été présentées, il est possible de débiter ce rapport par une revue de l'état de l'art. Celle-ci a permis le développement de tous les protocoles de recherche de ce travail. Elle est aussi employée afin de mieux expliquer pourquoi l'analyse de fonds d'images est si importante pour le calcul d'indices de sévérité (voir section 3).

2 REVUE THÉORIQUE

Cette section a pour but la description des principales théories sur lesquelles se basent les expérimentations nécessaires au développement de techniques d'analyse de fonds d'images de radiographies. Tel que mentionné précédemment, ce sont ces données qui vont mener au calcul des indices de sévérité de la corrosion. Présentement, il n'y a aucune méthodologie qui permette l'analyse numérique des fonds de conduites radiographiées et cette affirmation est confirmée dans la revue de littérature (voir section 3). Il est donc nécessaire d'amasser l'information théorique requise pour la mise en place d'essais en laboratoire. Il faut ainsi identifier un protocole de travail précis et celui-ci doit permettre la génération et l'étude de données de fonds d'images. Notons que l'étude de données industrielles est aussi considérée et ce cas est traité à la section 4 de ce document. En omettant les données industrielles, il existe deux autres catégories de techniques qui peuvent mener à la génération de fonds d'images radiographiques soit : les simulations Monte-Carlo ou la génération directe de structures corrodées. Les méthodes Monte-Carlo seront traitées plus spécifiquement aux sections 3 et 4 de ce document. L'étude de fonds de radiographies, réalisée à partir de conduites corrodées en laboratoire, requiert quant à elle une bonne connaissance des théories électrochimiques de la corrosion. En effet, il est nécessaire de bien saisir les divers articles concernant la dégradation pour développer des protocoles d'essais adéquats.

Les méthodes statistiques de designs et d'analyses d'expériences [DOE] sont aussi employées dans ce travail. Elles ont été appliquées afin de définir tous les protocoles expérimentaux qui sont retrouvés au niveau de la phase expérimentale de ce document. Leur mention au niveau de la revue théorique est donc d'une grande utilité.

Comme l'objet de l'étude touche la radiographie, il est primordial de bien expliquer tous les concepts et théories qui entourent ce domaine. De plus, il est

nécessaire de bien saisir les paramètres d'applications en chantier de cette méthode non destructive afin de fournir des protocoles d'analyses adéquats et réalistes. En somme, la revue théorique est subdivisée en trois principales sections qui touchent respectivement les techniques de DOE, la théorie de la corrosion et la revue des principales techniques de radiographie industrielle.

2.1 Designs et analyses statistiques d'expériences

Dans le cadre de ce mémoire, plusieurs techniques d'analyses statistiques seront employées afin de générer des protocoles d'essais ainsi que d'analyser les résultats provenant de ces derniers. Les techniques de designs statistiques d'expériences permettent la génération d'essais expérimentaux testant plusieurs facteurs à la fois, balancés et optimaux. En d'autres termes, le nombre d'essais réalisés à l'aide de telles techniques est minimal. De plus, le fait de tester tous les facteurs à la fois permet d'obtenir tous les effets directs et d'interactions qu'ont les variables sur une réponse mesurée. Les techniques DOE constituent donc de puissants et rigoureux outils expérimentaux qui permettent d'obtenir des résultats fiables provenant d'un nombre limité d'essais. Ils seront donc utilisés afin de réaliser toutes les expérimentations de ce projet.

Il est possible de regrouper les divers modèles d'analyses statistiques en quatre principales catégories soit : les techniques de design expérimental, les méthodes d'analyses ANOVA, les diverses techniques de régression et les outils d'analyses comparatives de base. Les techniques de designs d'expériences consistent en la génération de matrices d'essais expérimentaux simples et bien balancées. La totalité des informations relatives à ces dernières ont été tirées de Montgomery (2001) et de Mason, Gunst et Hess (2003). Il est très difficile de décrire ce qu'est le design d'expérience en quelques lignes toutefois, il est possible d'affirmer qu'une telle technique permet de réduire considérablement le nombre d'essais à réaliser tout en permettant une analyse

simple et fiable. L'illustration de son utilisation constitue la meilleure description pouvant être réalisée (voir sections 6 et 7). Il en va de même pour les méthodes de régression et les techniques ANOVA. Cependant, on peut mentionner ici que les informations relatives à ces deux techniques d'analyses statistiques ont été tirées de Neter, Kutner et Nachtsheim (2005). L'utilité de la première est de permettre la génération de modèles basés sur des facteurs quantitatifs. Les méthodes ANOVA permettent, quant à elles, de produire des modèles incluant des facteurs qualitatifs. En ce qui a trait aux techniques de base, elles seront, elles aussi, expliquées plus en détails lors de leurs utilisations (voir sections 6 et 7). En effet, sans un contexte bien précis, la description de telles méthodes pourrait nécessiter plusieurs centaines de pages. Ces techniques comprennent généralement la comparaison entre deux moyennes ou entre deux variances, la vérification de la normalité, etc. Mentionnons finalement que plusieurs informations relatives à ces techniques de bases ont été tirées de Ostle, Turner, Hicks et McElrath (2001).

2.2 La corrosion

Tel que mentionné précédemment, la compréhension des phénomènes de dégradation peut grandement contribuer au développement de procédures d'essais accélérés requises afin d'obtenir des morphologies de corrosion à radiographier. Avant de décrire les théories électrochimiques de base en corrosion, il faut à priori mentionner que cette section n'a pas pour but la description de techniques d'essais généralement employées pour caractériser les divers phénomènes de nature électrochimique. Pour des raisons de concision, certaines théories de la corrosion seront brièvement exposées suivies d'explications relatives à certains mécanismes de dégradation bien précis. Notons finalement que les informations présentées dans le cadre de cette section sont principalement tirées de deux sources de référence soit: La American Society for Materials [ASM] (1990) et de Dieter (1997).

2.2.1 Concepts de base de la corrosion en milieu aqueux

Comme dans toutes réactions chimiques, la corrosion est guidée par une combinaison de conditions thermodynamiques et cinétiques. Dans ce cas, la partie thermodynamique est représentée par un potentiel alors que la cinétique est expliquée à l'aide d'un courant. Le potentiel électrochimique standard, E (en volts), peut aisément être relié aux paramètres thermodynamiques à l'aide des équations 2.1 et 2.2. Il faut aussi mentionner la possibilité de transformer le potentiel standard à l'aide de l'équation de Nernst (voir équation 2.3). Celle-ci permet d'obtenir l'état thermodynamique d'un système en toutes conditions. Notons aussi qu'il est possible d'obtenir une idée du comportement de certains systèmes en se basant sur deux outils à caractère thermodynamique. Le premier, relativement simple, consiste en une table de classification des éléments par rapport à l'hydrogène, dont la réaction a été arbitrairement positionnée au potentiel 0 (voir tableau 2.1). Cette réaction constitue l'électrode standard à l'hydrogène ou « ENH ». Dans cette échelle, les éléments ayant un grand potentiel peuvent être considérés comme nobles et donc, très stables. Dans la même veine, plus le potentiel de réaction est faible et plus un élément peut être considéré comme réactif. Notons que les données présentées à ce tableau peuvent aussi être ajustées en fonction des diverses conditions du milieu à l'aide de l'équation de Nernst. Cette transformation engendre le deuxième outil de représentation soit le diagramme de Pourbaix. Dans ce cas particulier, les droites du graphique sont tracées à partir du potentiel réversible, E_{rev} (en volts), et de la concentration en ions hydrogène, H^+ (pH). La construction de tels graphiques ne sera pas présentée dans le cadre de ce projet puisque celui-ci ne vise pas l'étude thermodynamique de réactions électrochimiques. Cependant, un tel outil permet d'évaluer efficacement la présence de réactions électrochimiques dans des conditions données.

Équation 2.1 : $\Delta G = -nFE$

Équation 2.2 : $\Delta G^0 = -nFE^0$ (à l'équilibre)

Où n est le nombre de charges impliquées dans la réaction, F est la constante de Faraday en coulombs par moles.

Équation 2.3 : $E_{rev} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{\prod a_{ox,i}^{b,i}}{\prod a_{red,i}^{c,i}} \right)$

Où $a_{ox,i}$ est l'activité des espèces oxydées, $a_{red,i}$ est l'activité des espèces réduites et E_{rev} est le potentiel réversible de la réaction en volts

Tableau 2.1 : Table de classification électrochimique des éléments

Demi réactions	Potentiel standard en V (vs ENH)
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	1.500
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
$\text{Ag}^+ + 1\text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	0.800
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0.337
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0.000 (Référence, ENH)
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.250
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0.440
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.740
$\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.910
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0.763
$\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ti}$	-1.630
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1.660
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2.370
$\text{Li}^+ + 1\text{e}^- \rightarrow \text{Li}$	-3.050

L'étude thermodynamique des états électrochimiques ne peut pas, à elle seule, expliquer toutes les réactions qu'il est possible de rencontrer en milieux aqueux. Il faut effectivement faire intervenir le courant de corrosion afin d'obtenir une explication globale et complète des systèmes. Ce paramètre, lorsqu'il est relié à la loi de Faraday, permet d'expliquer la rapidité d'une réaction en cours (voir équations 2.4 et 2.5).

Équation 2.4 : $I = nF \frac{dn_i}{dt}$

Où n est le nombre d'électrons impliqués dans la réaction et $\frac{dn_i}{dt}$ la vitesse de réaction en moles par secondes.

Équation 2.5 : $I = \frac{nFm}{Mt}$

Où m est la perte de masse du matériau corrodé (en grammes), M est la masse moléculaire du matériau (en grammes par moles) et t est le temps (en secondes).

De plus, dans le cadre d'expérimentations et d'essais électrochimiques, le courant peut être représenté en fonction du potentiel afin d'obtenir une représentation du comportement électrochimique d'un système donné. Une bonne compréhension de ces courbes est primordiale afin de bien interpréter la littérature électrochimique qui peut mener au développement d'essais de corrosion accélérés. Les paragraphes qui suivent ne porteront pas sur le développement des diverses lois électrochimiques, mais plutôt sur l'interprétation des courbes expérimentales de type « courant-potentiel ». En effet, un développement théorique complet alourdirait inutilement le document et l'étude des courbes expérimentales suffit largement au développement d'une bonne compréhension des divers phénomènes électrochimiques.

Afin de bien caractériser les systèmes électrochimiques, il est primordial de produire des courbes anodiques et cathodiques. La réaction anodique concerne la zone oxydée alors que la réaction cathodique se rapporte à la zone où se produisent les gains électroniques (réduction). En termes simples, c'est la zone anodique qui se dégrade et ce, par rapport à la cathode. L'illustration du phénomène de corrosion est relativement aisée à saisir (voir figures 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4). La figure 2.1 illustre premièrement le comportement anodique d'un système avec trois paliers de potentiels bien distincts; il

s'agit ici des zones active, passive et transpassive, qui sont respectivement délimitées par les potentiels E_p et E_b . Les quatre figures qui suivent (figures 2.2 à 2.4) présentent l'intersection de courbe cathodique et anodique qui permet d'évaluer le potentiel et le courant de corrosion (E_{corr} et i_{corr}). Si la courbe anodique est intersectée avant E_p , le système étudié montre un courant de corrosion élevé et donc une dégradation rapide et normalement généralisée (voir figure 2.2). Dans le cas où la courbe cathodique croise la zone située entre E_p et E_b (et uniquement cette zone), une baisse de courant est observée (et donc une baisse des taux de corrosion) et le comportement est dit passif (voir figure 2.3). Dans ce cas, une couche de quelques nanomètres d'épaisseur vient protéger l'électrode et limite la réaction anodique. Il existe finalement deux possibilités qui donnent lieu à un comportement électrochimique instable. Premièrement, la courbe cathodique peut croiser à la fois la courbe anodique située avant et après E_p . Le comportement devient donc difficilement prévisible et donne parfois lieu à des mécanismes de corrosion plus localisés (voir figure 2.4). Une couche passive initialement présente dans cet état demeure toutefois stable, à moins d'être mécaniquement altérée. La courbe cathodique peut aussi croiser la zone anodique située au-delà de E_b . Une telle « configuration » engendre une hausse du courant de corrosion par rapport au comportement passif ainsi que l'apparition des phénomènes de corrosion très localisés telle que la corrosion par piqûres. En bref, plus un matériau possède une grande zone passive (au niveau de sa courbe de polarisation) et plus ce dernier peut être caractérisé comme résistant à la corrosion dans un milieu donné. Il est important d'ajouter que la courbe anodique doit être située le plus près possible de l'abscisse. Finalement, plus le potentiel E_b est éloigné de E_p et plus le matériau possède une résistance élevée aux piqûres de corrosion. Ces courbes électrochimiques permettent donc d'obtenir une idée du comportement des matériaux lorsqu'ils sont exposés à divers électrolytes ainsi que d'établir de bonnes bases de comparaisons entre eux.

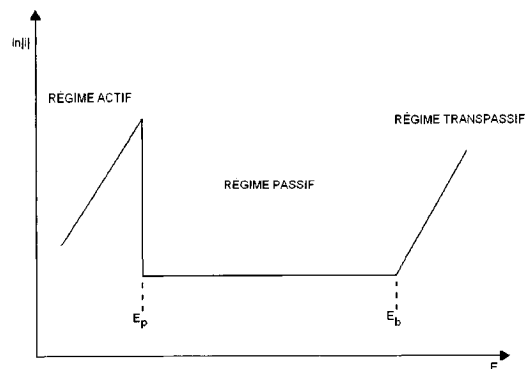


Figure 2.1 : Courbe anodique

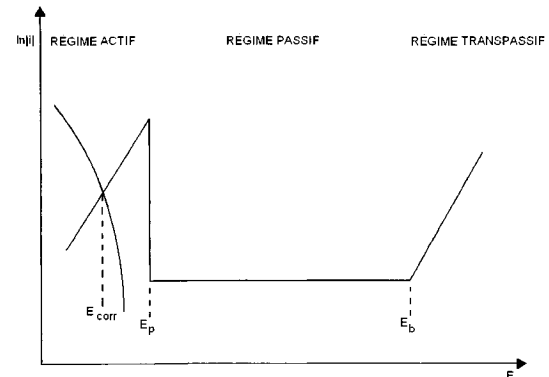


Figure 2.2 : Comportement actif

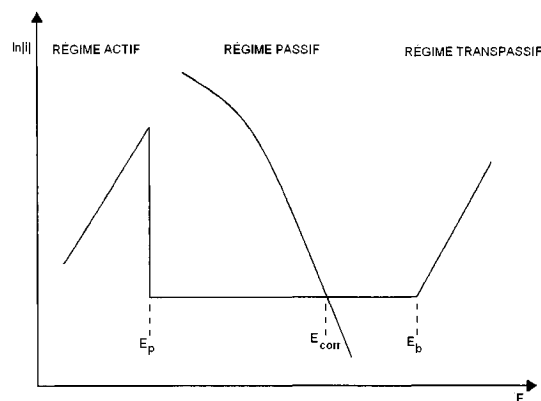


Figure 2.3 : Comportement passif

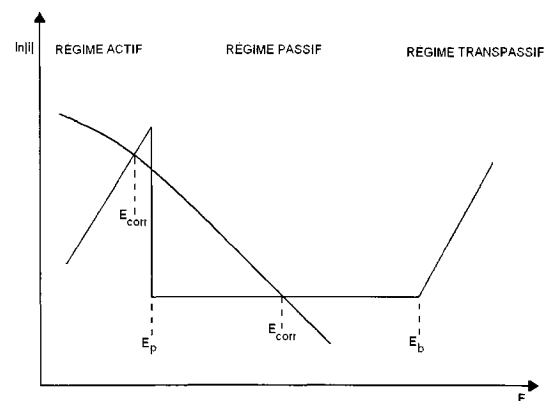


Figure 2.4 : Comportement instable

2.2.2 Principaux mécanismes de corrosion

Les informations théoriques fournies à la section précédente permettent de pousser l'étude de la corrosion un pas en avant. Il est maintenant possible d'examiner les mécanismes à la base des principaux modes de dégradation. Les informations fournies à cette section sont nécessaires afin d'évaluer la faisabilité d'essais de corrosion accélérés. Premièrement, les données théoriques retrouvées dans les paragraphes qui suivent vont permettre d'orienter une recherche d'articles traitant d'essais de corrosion. En second lieu, plusieurs couples matériaux-électrolytes potentiels seront identifiés. L'étude de faisabilité finale sera toutefois réalisée à la section 3.2. Quatre mécanismes de corrosion

sont couverts dans cette section soit : la corrosion généralisée, la corrosion par piqûres, la corrosion caverneuse et la corrosion intergranulaire.

Il est maintenant intéressant de parcourir de manière relativement sommaire les principaux mécanismes de corrosion. Notons aussi que les références, concernant cette section, ont été tirées de Dieter (1997) et de l'ASM (1990). La corrosion généralisée peut tout d'abord être traitée de manière très rapide, car les mécanismes à la base de sa génération sont relativement simples. En effet, ce type de corrosion est présent lorsqu'il y a une alternance aléatoire entre sites anodiques et cathodiques sur une même surface. Ce phénomène donne lieu à une surface accidentée et présentant des pertes d'épaisseurs macroscopiquement uniforme. Par ailleurs, comme les pertes d'épaisseurs dues à ce mécanisme de corrosion sont inhérentes au hasard, il ne serait pas surprenant de pouvoir les modéliser à l'aide d'une distribution normale dans le cadre de simulation Monte-Carlo.

La corrosion par piqûre est un phénomène beaucoup plus complexe et très difficile à caractériser. Les mécanismes reliés à son initiation et à sa propagation sont toujours peu connus et semblent dépendre de plusieurs variables. Cependant, certaines théories sont plus globalement acceptées et le critère E_b (voir section 2.2.1) en fait partie. Dieter (1997) a donc regroupé les principaux articles concernant l'initiation de piqûres de corrosion et classé ces derniers selon trois principaux mécanismes : la pénétration d'anions dans le film passif, la dépassivation aux défauts du film et la dissolution par adsorption. Dans tous les cas, l'initiation des piqûres requiert la présence d'ions agressifs tel que le Cl^- . Dans le premier cas, les ions chlorure migrent dans la couche passive et remplacent certains de ses constituants; celle-ci se trouve donc affaiblie. Ce mécanisme est observé au niveau de surfaces ayant été passivées en présence d'ions agressifs où lors de l'exposition de surfaces ayant été passivées (sans Cl^-) à des solutions contenant de tels ions. Il est aussi possible que des défauts de surface soient à la base de faiblesses au niveau de la couche de protection. Dans ce cas, ces zones subissent une

dépassivation (une attaque) plus rapide et voient la possibilité de régénération de leur couche protectrice annihilée par la présence d'ions Cl^- . Le troisième mécanisme concerne la dissolution de la couche passive par l'absorption d'ions Cl^- .

Une fois la piqûre initiée, cette dernière progresse de manière très rapide car la surface attaquée est très petite par rapport à la zone cathodique qui l'entoure, ce qui génère une grande densité de courant de corrosion. La concentration en ions agressifs (principalement Cl^-) ainsi que la température tendent aussi à faire diminuer le potentiel E_b . Donc, la possibilité de voir apparaître et croître des piqûres dans un matériau donné augmente en même temps que ces paramètres. Le mécanisme de croissance d'une piqûre est autocatalytique. Dans certains cas, le pH en fond de piqûre est faible (présence d'ions H^+) dû à des réactions d'hydrolyse ce qui engendre la migration des ions chlorure en fond de piqûre. La région attaquée favorise ainsi la présence d'ions agressifs et crée les conditions propices à la progression de sa dégradation. Comme la corrosion est localisée et que l'accès à la piqûre est limité, il devient difficile de changer les conditions en fond de piqûre pour retrouver des paramètres propices à la passivation.

Deux autres mécanismes de dégradation peuvent aussi être considérés afin de construire certains protocoles de corrosion accélérée. Il s'agit ici de la corrosion de type intergranulaire et de la corrosion caverneuse. Dans le premier cas, la dégradation et la perte d'épaisseur sont accélérées par une attaque localisée au niveau des joints de grains. Cette attaque entraîne parfois un détachement très rapide des grains eux-mêmes. Parmi les divers alliages commerciaux, mentionnons les aciers inoxydables qui sont très sensibles à ce type de dégradation. En effet, dans des conditions thermiques idéales, il est possible d'engendrer la précipitation du $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ aux joints de grains. La formation de tels carbures diminue fortement la teneur en chrome au niveau des joints de grains, ce qui fait chuter la capacité de ces zones à se protéger. De telles conditions thermiques peuvent être retrouvées lors d'opérations de soudage. Certains intermétalliques, présents dans divers alliages, génèrent aussi ce type de dégradation.

Il est aussi possible d'observer, dans certaines conditions, l'apparition de corrosion dite « caverneuse ». Ce mécanisme est principalement basé sur la différence de potentiels entre les zones pauvres en oxygène (piles d'oxygène) et les zones bien aérées. Dans ce type de corrosion, les surfaces adjacentes aux zones où l'électrolyte contient peu d'oxygène deviennent actives simplement parce que l'oxygène n'est pas présent en quantité suffisante pour engendrer une passivation spontanée. Les zones plus riches en oxygène demeurent toutefois passives. Comme pour la corrosion par piqûres ou la corrosion intergranulaire, plus la taille de la surface active est faible et plus la vitesse de corrosion y est rapide. Plusieurs installations favorisent ce type de corrosion tels que : des plaques boulonnées ou rivetées (où l'oxygène peut difficilement accéder aux interstices), des joints de conduites métalliques qui peuvent engendrer des zones difficiles à aérer, etc. En plus du phénomène de pile de concentration, les zones bien aérées tendent à augmenter leur pH par génération d'ions OH^- alors que les zones peu aérées s'acidifient. Ce comportement favorise la réaction de corrosion localisée (zones peu aérées), car la présence d'un pH plus basique aide à conserver l'état passif de la zone qui n'est pas attaquée. Mentionnons finalement que ce type de corrosion peut aussi être aggravé par la présence d'ions agressifs tel que le Cl^- .

2.3 La radiographie industrielle

Cette section a pour but de décrire les principaux éléments théoriques relatifs à la radiographie industrielle. La majorité des propos tenus aux paragraphes qui suivent sont tirés du livre « radiologie industrielle » (Ruault 1991) et des normes ASTM (ASTM Standards 2004a, 2004b, 2004c, 2004d). Les premiers concepts de base de la radiographie et de la gammagraphie industrielle seront tout d'abord présentés suivis d'un survol des principales théories physiques employées dans ce domaine. Les concepts

d'interactions photons-matière seront aussi traités suivis d'une description des phénomènes entourant la méthode de mesure par films radiographiques.

2.3.1 Concepts de base de radiographie industrielle

Avant d'entreprendre la description des diverses théories entourant la radiographie industrielle, il est primordial d'exposer, pour des raisons de clarté, les diverses unités employées dans le domaine. Premièrement, l'activité d'une source radioactive est exprimée en Becquerel (Bq), qui signifie une transition nucléaire par seconde. Cette unité n'est toutefois pas employée dans le cas des sources de rayons X dont la puissance est caractérisée par une différence de potentiel. Lorsque le concept de dose absorbée entre en compte, l'unité à employer est le gray (Gy) ou le rad (Rad). Ces unités expriment le nombre de joules absorbés par kilogramme de matière. Dans le cas de rayonnement non directement ionisant (cas des rayons γ et X), l'unité à employer devient le kerma. Il est aussi possible d'exprimer la dose absorbée en Coulombs par kilogramme ; 0.0295 C kg^{-1} correspondant à 1 gray. Notons que la dose absorbée peut aussi être exprimée en terme de « débit de dose » ce qui implique la dose absorbée par unité de temps.

Il convient maintenant de décrire sommairement les principaux « mécanismes » de détection des défauts à l'aide de films radiographiques. Notons que ce travail, de par son caractère, vise plus particulièrement la description des phénomènes entourant la gammagraphie que la radiographie par rayons X. Il est tout d'abord important de mentionner que la source qui a été employée dans le cadre de ce travail est à base d'iridium 192 [^{192}Ir]. Celle-ci possède plusieurs énergies de rayonnement gamma neutre ainsi que deux autres types de rayonnements soit le beta et le alpha. Ces derniers ne seront pas couverts dus à leurs faibles influences dans le procédé de radiographie. En effet, c'est le rayonnement gamma qui permet de rendre les objets visibles sur un film radiographique; les deux autres types sont généralement absorbés dans l'air. Le

rayonnement de type gamma, dans le cas des sources ^{192}Ir , possède trois raies ayant chacune une énergie caractéristique. Une première raie est donc retrouvée à 310 keV, une autre à 470 keV et une dernière à 600 keV. Notons qu'approximativement 61% de l'émission possède une énergie de 310 keV alors que les niveaux à 470 et 600 keV se partagent environ 28% et 11% de l'émission respectivement. Ajoutons qu'une source radioactive, naturelle ou artificielle, perd de sa puissance en fonction du temps par les phénomènes de dégradation à la base de la génération du rayonnement radioactif. Une source ^{192}Ir est produite de manière industrielle et livrée avec une activité initiale A_0 . Celle-ci est généralement constituée de plusieurs petits disques d'iridium dont le nombre varie en fonction de la puissance désirée. Ce type de source prend donc la forme d'un cylindre de longueur finie; elle n'est donc pas ponctuelle, ce qui est à la base d'imprécisions (voir section 2.3.3. La décroissance de l'activité d'une source (A_t) peut aussi être évaluée en fonction du temps grâce à équation 2.6. Cette équation requiert toutefois la connaissance de la demi-vie (T) de la matière radioactive constituant la source. Généralement, une source d'iridium commerciale va perdre la moitié de sa puissance en l'espace de quelques mois. La connaissance de la puissance de la source est primordiale lors de la construction de protocoles d'inspection et chaque source est accompagnée d'une table de décroissance basée sur l'équation 2.6.

Équation 2.6 : $A_t = (A_0) \left(2^{-t/T} \right)$

En plus de la variation observée au niveau de l'émission, plusieurs réactions peuvent avoir lieu entre les rayons gamma et la matière. Ces mécanismes peuvent aussi être retrouvés au niveau de la source elle-même. Les mécanismes les plus probables concernent des collisions entre le rayonnement gamma et les atomes constituant la matière. L'ionisation de certains atomes et leur retour à un état stable implique la production de rayons X, dont l'énergie est caractérisée par la nature de l'élément ionisé ainsi que par les couches électroniques concernées. En bref, lorsqu'un rayon gamma

traverse une pièce, il y a production d'un rayonnement secondaire. De manière plus concrète, ce phénomène se traduit par une augmentation du flux de photons sortant après le passage du rayonnement incident dans la pièce. Il devient ici important de bien expliquer les divers mécanismes d'absorption et de production des flux de photons. Le flux de photons diminue après avoir traversé une pièce donnée et ce phénomène obéit à une loi d'absorption exponentielle. L'équation 2.7 exprime bien la diminution du flux transmis, ayant traversé un matériau d'épaisseur x , par rapport au rayonnement incident. Cette équation implique aussi un facteur d'absorption linéique relié au matériau soit μ . Ce dernier caractérise la capacité d'un matériau donné à absorber le rayonnement. Les implications reliées à une telle équation seront décrites plus en détails à la section 2.3.2. Certaines dimensions bien précises sont aussi employées afin d'évaluer les divers débits de dose (en Kerma, \dot{K}). En effet, il est possible d'identifier l'épaisseur requise, en fonction d'un matériau donné, qui permet de diminuer le débit de dose de moitié ($e_{0.5}$ couche de demi-transmission, voir équation 2.8) ou du dixième ($e_{0.1}$ couche de deci-transmission, voir équation 2.9). Ces paramètres peuvent aussi être exprimés de manière volumique (volume de demi-transmission, coefficient d'absorption volumique, etc.).

Équation 2.7 : $\phi_T = \phi_I e^{-\mu x}$

Où ϕ_T est le flux transmis, ϕ_I est le flux incident, μ est le coefficient d'absorption linéique et x est l'épaisseur traversée.

Équation 2.8 : $\frac{\dot{K}_T}{\dot{K}_I} = \frac{1}{10}$, donc $\dot{K}_T = \dot{K}_I \left(10^{-x/e_{0.5}} \right)$

Équation 2.9 : $\frac{\dot{K}_T}{\dot{K}_I} = \frac{1}{2}$, donc $\dot{K}_T = \dot{K}_I \left(2^{-x/e_{0.1}} \right)$

Le matériau ne constitue pas la seule zone où l'intensité du rayonnement se voit diminuer. En effet, une grande partie des pertes de débit s'effectuent dans l'air. L'air ne possède toutefois pas une grande capacité d'absorption; la majeure partie de ces pertes est causée par la distance parcourue par le rayonnement de la source à la pièce. L'équation 2.10 montre effectivement que le débit de dose surfacique doit demeurer constant et donc, le débit incident diminue en fonction du carré de la distance traversée.

$$\text{Équation 2.10 : } 2\pi r_1^2 \dot{K}_1 = 2\pi r_2^2 \dot{K}_2 \text{ donc, } \frac{\dot{K}_1}{\dot{K}_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

Il est maintenant à propos d'effectuer un retour sur le phénomène de rayonnement X secondaire mentionné précédemment. Ce dernier peut être caractérisé par un coefficient B , au niveau des équations décrivant l'évolution du débit de dose. Il est donc possible d'obtenir l'équation 2.11 grâce à l'ajout de ce coefficient. Cette formule s'applique à l'équation générale d'absorption (en fonction de μ) ainsi qu'aux couches de déci-transmission et de demi-transmission. La figure 2.5 ainsi que la figure 2.6, montrent bien l'évolution du facteur B en fonction de plusieurs paramètres rencontrés en radiographie. Dans le cas de la figure 2.5, il est possible de remarquer que le nombre de photons secondaire émis augmente avec l'épaisseur traversée (x) et le coefficient d'absorption. Des sources plus faibles semblent aussi générer un rayonnement secondaire plus important. La figure 2.6 exprime la même réalité pour de l'acier au carbone et situe les sources radioactives industrielles typiques. Les paramètres reliés aux pièces ont donc des incidences très importantes sur les radiographies obtenues.

$$\text{Équation 2.11 : } \dot{K}_x = B\dot{K}_I e^{-\mu x} \text{ ou } \dot{K}_{0.5} = B\dot{K}_I \left(2^{-x/e_{0.5}}\right) \text{ et } \dot{K}_{0.1} = B\dot{K}_I \left(10^{-x/e_{0.1}}\right)$$

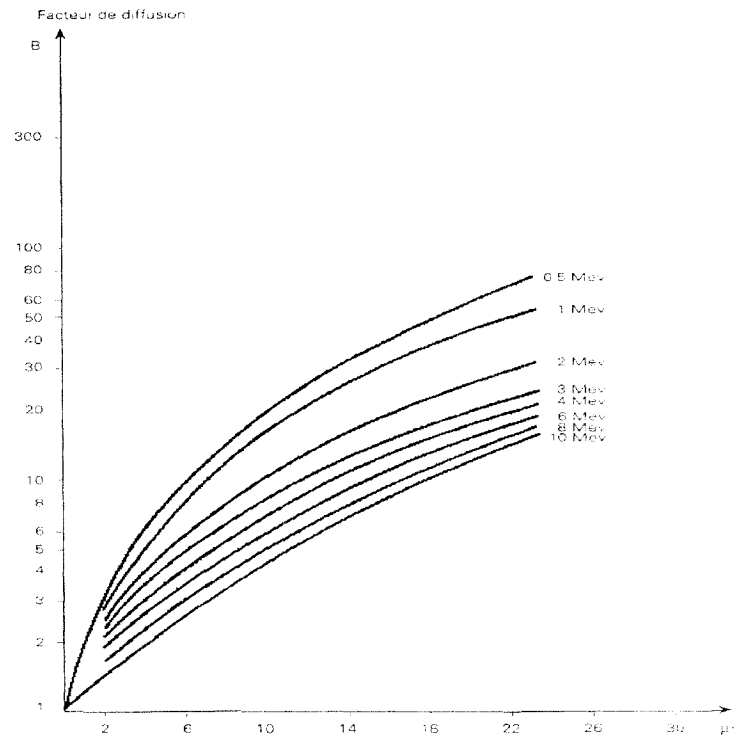


Figure 2.5 : B en fonction de l'épaisseur traversée et de μ
Tirée de Ruault (1991)

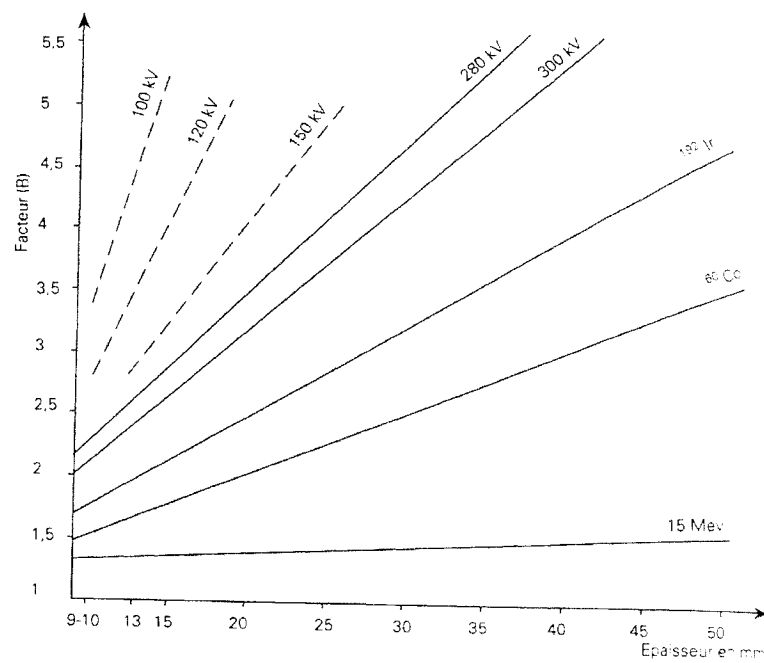


Figure 2.6 : B en fonction de l'épaisseur traversée
Tirée de Ruault (1991)

2.3.2 Application des principes théoriques de la radiographie

Grâce aux équations développées à la section précédente, il devient plus aisé de comprendre les phénomènes entourant la radiographie industrielle appliquée à la détection de défauts. En effet, si un rayonnement incident traverse une zone poreuse dans la pièce, causée par une fissure ou une cavité, son absorption sera moins importante et son intensité sera donc plus grande à son arrivée au film. Il en va de même pour les zones de nature chimique différente qui font varier le coefficient μ .

Il est maintenant nécessaire d'expliquer les divers concepts entourant l'utilisation de films radiographiques. En effet, la radiographie nécessite un support qui permet de recueillir l'information contenue dans les rayons X ou gamma ayant traversé la pièce et de traduire celle-ci sous forme d'image. Il existe plusieurs types de films qui possèdent des domaines d'application bien précis. Ces derniers sont aussi caractérisés par des courbes d'exposition appelées courbes de Hürter-Driffeld (courbe HD, voir figure 2.7). Ces dernières représentent la densité optique d'un film, qui est définie comme l'affaiblissement d'un signal lumineux le traversant. Cette caractéristique peut être mesurée par des appareils standardisés appelés densitomètres. En temps normal, ces courbes présentent trois zones dont deux sont non linéaires sous la forme logarithmique. Cependant, la quasi-totalité des travaux réalisés en radiographie ne prennent en compte que la zone linéaire de la courbe. Celle-ci correspond à la zone « lisible » du film et de manière générale, un film devrait posséder une densité optique variant entre 1,5 et 4 afin d'être interprétable. Une densité supérieure à 4 implique un film surexposé ou trop noirci alors qu'une densité inférieure à 1,5 correspond à un film sous exposé ou trop clair. Cependant, dans certains cas comme en radiographie de conduites, la forte variation des épaisseurs radiographiées génère des densités dans le domaine non linéaire. Les zones les plus exposées restent sous 4, les zones les plus claires chutant sous la barre de 1,5.

L'évolution de la densité sous 1,5 est beaucoup moins rapide que dans la portion linéaire. Cette région est aussi régie par des mécanismes chimiques au niveau du film qui n'ont rien à voir avec le degré d'exposition de celui-ci. Ces courbes permettent de relier divers paramètres de radiographie aux l'aspects visuels d'images. Toutefois, les techniciens en radiographie n'utilisent pas les courbes d'exposition, mais plutôt des règles de calculs qui produisent des résultats plus approximatifs.

Tel que mentionné au paragraphe précédent, de fortes variations d'épaisseurs dans les pièces peuvent engendrer l'apparition de zones sous exposées ou sur exposées. Heureusement, il existe plusieurs catégories de films dont certains sont moins sensibles à ce type de variations. En effet, des films de grande latitude permettent la radiographie de pièces comportant de fortes différences d'épaisseurs en de faibles temps d'exposition. Ces films possèdent une courbe HD très près de l'axe des Y et dont la pente de la zone linéaire est faible (voir figure 2.7). Ils sont toutefois moins sensibles aux petits défauts et aux petites variations observables dans une pièce. Les défauts plus fins sont cependant repérables à l'aide de films à forte sensibilité. Ces films possèdent des courbes ayant une pente plus forte et sont plus éloignés de l'axe Y (voir figure 2.7). Ils sont cependant plus lents à exposer et ne permettent pas la caractérisation complète de pièces présentant de forts gradients d'épaisseur. Il est donc important de bien choisir le type de film à employer lors des séances de radiographie.

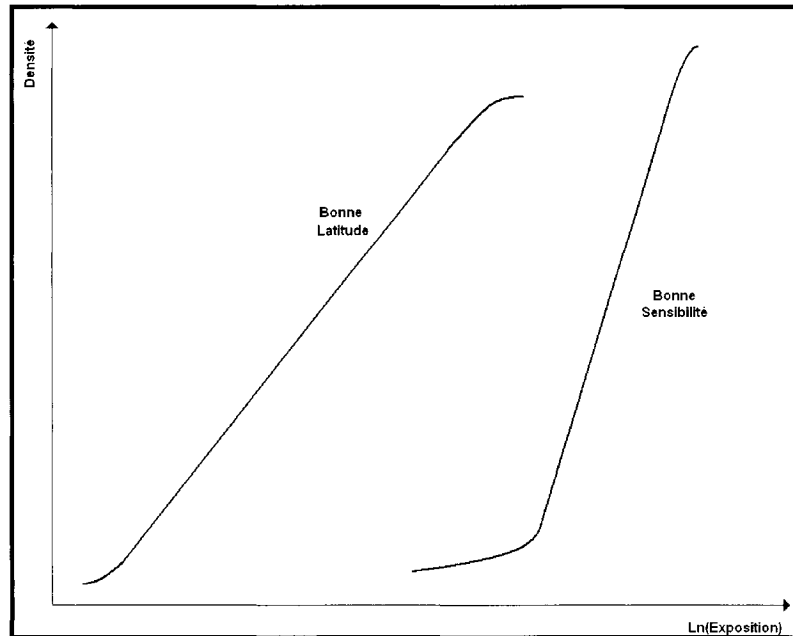
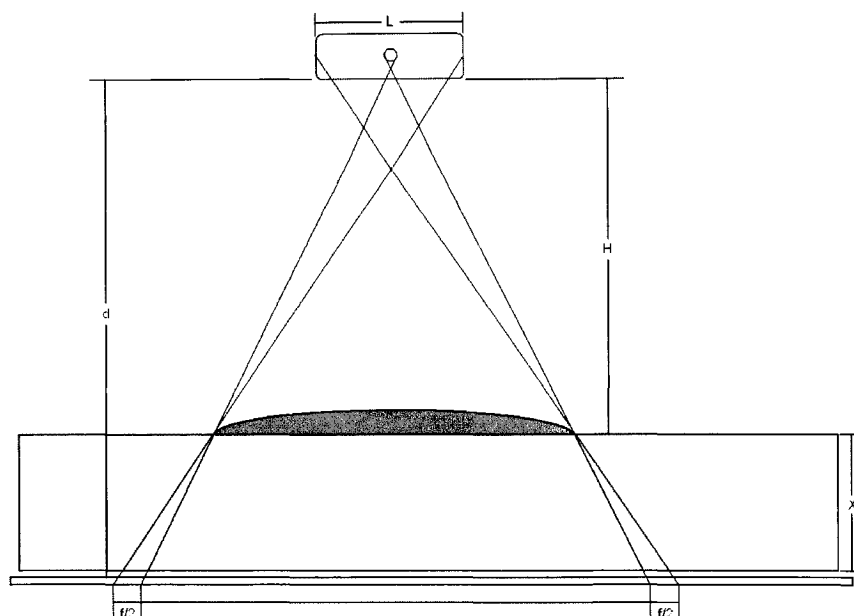


Figure 2.7 : Courbes d'exposition de Hürter-Driffield

Il est maintenant plus aisé de bien saisir les mécanismes entourant la détection de défauts à partir de films radiographiques. Tel que mentionné en début de section, toutes les interactions entre le rayonnement et la matière se traduisent par des baisses plus ou moins importantes du débit de dose au sortir de la pièce. Ces variations sont captées par le film et transformées sous forme d'images de type binaire (en noir et blanc). Par exemple, une porosité qui génère un débit de dose sortant plus élevé (augmente l'exposition) va engendrer l'apparition d'une zone foncée dans le film (génère une densité plus élevée).

2.3.3 Principales sources d'imprécisions

Les techniques radiographiques permettent certes la détection d'une grande plage de défauts et fournissent une bonne vue d'ensemble de ces derniers. Cependant, elles sont aussi affectées par plusieurs sources d'imprécisions qui diminuent leur efficacité. Mentionnons en premier lieu, la génération de rayonnement secondaire traité en 2.3.2. Les rayons X générés par le passage du rayonnement gamma dans le matériau interagissent eux aussi avec le film, mais comme ils ne comportent aucune information spécifique aux objets analysés, ils engendrent du bruit. De plus, la source elle-même est à la base d'imprécisions. En effet, le fait d'utiliser une source non ponctuelle de forme cylindrique engendre la formation d'un flou au pourtour des objets radiographiés. La figure 2.8 ainsi que l'équation 2.12 illustrent bien ce phénomène. En effet, ces dernières montrent que l'utilisation d'une source non ponctuelle engendre une zone mal définie de taille totale f au niveau du film. Cette zone est appelée flou géométrique. Notons que cette zone floue peut aussi être influencée par le rayonnement secondaire. La position de la source par rapport à l'objet radiographié et par rapport à la position du film peut aussi engendrer certains phénomènes néfastes au niveau de l'exposition. Ces phénomènes seront traités plus en détails à la section 6. Finalement, les films eux-mêmes, de par leur nature chimique, peuvent générer des variations de densités. Dans ce cas, les variations sont dues à l'agglomération des cristaux d'halogénure d'argent qui composent le film. Ce point n'est toutefois pas traité en détails dans ce travail.



- En rouge, la source ponctuelle et en bleu, la source réelle

Figure 2.8 : Phénomène de flou géométrique

$$\text{Équation 2.12 : } f = \frac{Lx}{H} = \frac{Lx}{d-x}$$

2.3.4 Normes employées en radiographie industrielle

Il existe une multitude de normes qui doivent être respectées lors d'inspections radiographiques de pièces. Certaines d'entre elles sont mêmes très spécifiques à des domaines d'applications bien précis. Cette section ne vise certes pas l'étude de l'ensemble des documents à caractère normatif, retrouvés dans le domaine de la radiographie industrielle. Toutefois, certains documents incontournables se doivent d'être mentionnés. De plus, il est primordial de faire référence aux diverses normes qui seront employées dans ce travail. Il s'agit ici de normes provenant de l'ASTM et de l'Organisation internationale de Normalisation [ISO]. La première norme employée concerne la réduction du flou géométrique par un positionnement adéquat de la source

(ASTM standards 2004c). L'équation 2.13 constitue un appui théorique permettant positionner la hauteur de la source afin d'obtenir un flou géométrique donné. Les flous tolérés, en fonctions d'épaisseurs à analyser, sont aussi mentionnés dans la norme ASTM citée plus haut.

Équation 2.13 :
$$d = \frac{D_s x}{f} + x$$

Où d est la distance source-film à respecter, D_s est la diagonale de la source radioactive, f est le flou géométrique maximal toléré et x est l'épaisseur de la pièce analysée (se référer à la figure 2.8).

Il existe aussi certaines techniques très concrètes qui permettent la quantification de la qualité d'une radiographie donnée. Il s'agit des indicateurs de qualité d'image [IQI], qui peuvent prendre la forme de cercle ou de fils (ASTM standards 2004a, ISO 2004c). Ces derniers sont à la base de l'évaluation de la taille minimale d'objets qu'une radiographie permet de discerner.

3 REVUE DE LITTÉRATURE

Les théories présentées à la section précédente avaient pour but de fournir l'information nécessaire à la compréhension des diverses méthodes et techniques d'analyses qui seront employées tout au long de ce travail. Cependant, la réalisation de ce mémoire nécessite la connaissance des divers modèles probabilistes classiques employés lors de la caractérisation de la corrosion. En effet, ces modèles permettent de bien cibler le signal qu'il faut retirer des fonds d'images afin de caractériser la corrosion et d'obtenir un indice de sévérité. Tel que mentionné précédemment, trois types de signaux doivent être analysés. À cet effet, la première section de cette revue de littérature concerne des modèles probabilistes pouvant être utilisés pour l'étude d'épaisseurs de parois. Cette section touche aussi la reconnaissance de certaines caractéristiques, propres à divers mécanismes de corrosion, à partir d'images bidimensionnelles. De plus amples explications concernant ces modèles, leurs applications et leur utilité quant à la détermination de l'indice de sévérité de la corrosion, sont fournies à la section 3.1.

La revue de littérature touche aussi au domaine de la corrosion appliquée. Cette section a pour but de fournir des informations nécessaires à l'élaboration d'essais en laboratoire. Tel que mentionné aux sections 1 et 2, ces essais ont pour but de générer des morphologies de corrosion typiques à des mécanismes précis à l'intérieur de conduites. Ceux-ci doivent aussi être réalisés de manière accélérée. Deux principaux mécanismes de dégradation sont analysés à cette section soit : la corrosion généralisée et la corrosion par piqûres. Des données touchant d'autres mécanismes sont aussi présentées.

Finalement, la dernière section de la revue de littérature concerne les travaux qui ont été réalisés à ce jour dans le domaine de l'analyse numérique de fonds de radiographies de conduites. Cette section permet aussi de juger de la faisabilité de

l'application de méthodes Monte-Carlo dans la génération de données de fonds d'images. En somme, la revue de littérature est divisée en trois principales sections qui touchent respectivement les modèles statistiques et probabilistes appliqués à l'étude de la corrosion, les essais de dégradation accélérée et finalement, l'étude de fonds de radiographies numérisées.

3.1 Modèles probabilistes d'analyses de la corrosion

Il existe plusieurs travaux qui font mention de la possibilité que certains phénomènes de corrosion puissent être fidèlement représentés par des modèles statistiques existants. Toutefois, avant de procéder à la description de ces modèles, il est utile d'illustrer la méthode d'utilisation de ces derniers. Prenons par exemple, des épaisseurs mesurées qui suivent une loi normale (voir figure 3.1) et une épaisseur critique représentée par la ligne pointillée bleu. Ce schéma indique qu'une grande partie des épaisseurs mesurées (à droite de la ligne pointillée) dépassent déjà l'épaisseur maximale fixée. En fait, la probabilité de retrouver de telles épaisseurs est de 25%. Cette situation pourrait être jugée critique. Ce cas représente bien l'avantage d'identifier les distributions modélisant les épaisseurs de parois mesurées. Elles permettent premièrement de fournir des probabilités utiles au calcul de l'indice de sévérité et évitent d'avoir à travailler avec une série de mesures d'épaisseurs de parois résiduelles. Plusieurs autres modèles autres que la loi normale pourraient aussi être utilisés.

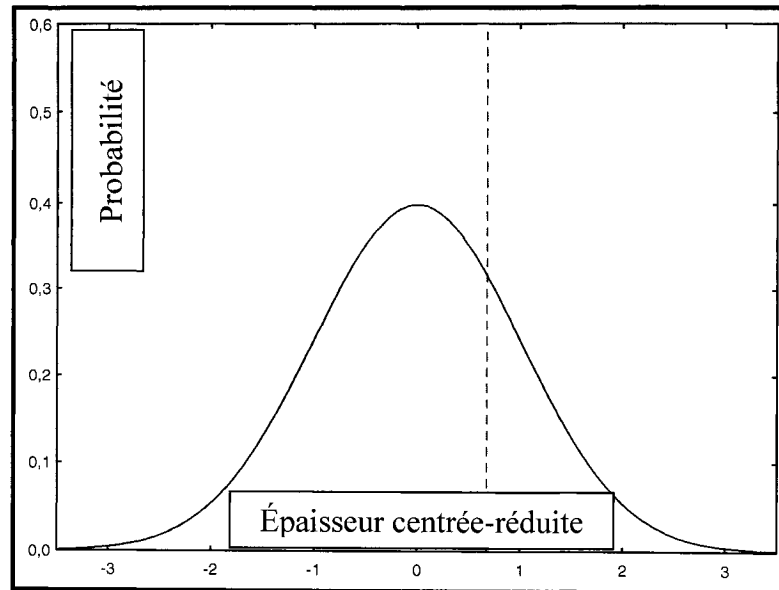


Figure 3.1 : Représentation de l'utilisation de la loi normale

Le premier travail qui va dans cette direction est un impressionnant projet entrepris par Staehle, Gorman, Stavropoulos et Welty (1991). Celui-ci décrit l'utilisation de la distribution « Weibull » à trois paramètres (t_0 , b et θ) dans le cadre de l'analyse du phénomène de corrosion sous contrainte (fissuration sous contrainte) observé dans des tuyaux de bouilloires de générateurs de vapeur. Ce phénomène de dégradation est de loin une des principales sources de bris retrouvées dans ce type de système. De plus, ce dernier est fortement localisé et donc très difficile à repérer, à prévoir et même à suivre à l'aide de méthodes d'inspection traditionnelles. Toutefois, les travaux de Staehle, Gorman, Stavropoulos et Welty (1991) ont permis de vérifier que la probabilité de bris engendré par un tel phénomène se modélise bien par l'utilisation de l'équation 3.1, qui présente la fonction de densité de la distribution Weibull (l'équation 3.2 décrit la fonction cumulative ou l'intégrale de l'équation précédente).

$$\text{Équation 3.1 : } f(t) = \left[\left(\frac{b}{\theta - t_0} \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^{b-1} \right) \right] \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^b \right]$$

Équation 3.2:
$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^b \right]$$

Où t_0 est considéré comme le temps d'initiation du phénomène, t est le temps puis b et θ sont des valeurs caractéristiques de la distribution.

Ce type de modélisation est largement employé dans le domaine de la maintenance préventive et permet de connaître l'état d'un système sans même inspecter sa structure. En effet, la connaissance des divers paramètres de la distribution permet d'associer un temps d'utilisation, t , à une probabilité de bris donnée. Lorsque cette probabilité devient trop élevée, il devient nécessaire d'inspecter ou de réparer le système. Plusieurs techniques mathématiques peuvent être employées afin d'identifier la fonction (de type Weibull) qui approche le plus les données observées. Les auteurs de l'article ont employé une méthode graphique. Cependant il est important de mentionner qu'il existe plusieurs autres techniques pour obtenir les paramètres t_0 , b et θ , telles que le maximum de vraisemblance, les techniques de régression, la méthode des moments, etc. Ces méthodes requièrent plus de calculs que les techniques graphiques, toutefois, elles peuvent être aisément exécutées à l'aide d'outils informatiques.

Les représentations sous forme Weibull ont aussi permis aux auteurs de comparer certaines conditions d'opérations ou encore de jauger les effets de changements de conditions d'opérations. Par exemple, Staehle, Gorman, Stavropoulos et Welty (1991) ont pu analyser l'effet bénéfique d'un grenaillage des parois des échangeurs par une diminution de la pente b , et d'une augmentation de θ . En termes simples, ces auteurs ont observé une baisse du taux de bris ainsi que par l'apparition d'un temps plus longs avant le premier bris (plus grand t_0). Cet exemple ne présente qu'une des multiples applications qui peuvent être offertes par l'utilisation de la distribution Weibull. Ce type d'approche statistique permet de faciliter la description et la compréhension de phénomènes critiques de corrosion dépendant de plusieurs

variables difficiles à contrôler et à caractériser (température, pH, contraintes résiduelles, contamination, etc.). La limitation d'une telle technique est toutefois évidente; il est nécessaire d'avoir une banque de données importante concernant le temps avant bris des structures étudiées. Notons toutefois que cette procédure peut aisément être adaptée à plusieurs autres types de données; il suffit de redéfinir ce qu'est un bris. Par exemple, un bris pourrait être le temps avant l'observation de piqûres de corrosion ou encore, le temps avant d'atteindre une épaisseur critique. Il serait aussi possible de remplacer le temps et de modéliser d'autres types de données. Cette méthode pourrait donc être employée dans le présent projet, il ne suffit que d'identifier un signal adéquat à modéliser.

Ces travaux sur la distribution Weibull montrent une autre possibilité associée à l'utilisation des modèles de probabilités. En effet, l'évolution de leurs paramètres pourrait être suivie dans le temps. Afin d'illustrer cette possibilité, reprenons ici le cas de la distribution normale précédemment illustrée. Cette distribution est toujours caractérisée par une moyenne (\bar{x}) et un écart-type (s), évalués à partir des pertes d'épaisseurs mesurées. Supposons ici que deux inspections aient été réalisées dans un intervalle de 5 ans. Les résultats de ces dernières sont illustrés à la figure 3.2. Les deux premières courbes montrent des évolutions de leurs moyennes (décalage de la courbe vers la droite) et de l'écart type (« élargissement » de la distribution) associée aux données de pertes d'épaisseurs mesurées. Comme ces deux paramètres évoluent dans le temps (d'une inspection à l'autre), il est possible de les utiliser afin d'estimer l'évolution de la corrosion pour une période donnée. En considérant la courbe verte comme le moment présent (première inspection), une projection de 5 ans montre un scénario similaire à celui observé à la figure 3.1. Dans cet exemple, l'état actuel des conduites n'est pas critique. La probabilité qu'une perte d'épaisseur soit supérieure à la perte maximale tolérable est même très près de 0. Cependant, il n'est pas recommandé d'attendre cinq autres années pour réaliser une troisième campagne d'inspection (courbe en bleu) car à ce moment, une fraction non négligeable des épaisseurs mesurées risque de dépasser la limite fixée. Il est donc intéressant de suivre l'évolution de l'indice de

sévérité dans le temps afin de prévoir les délais à respecter entre les campagnes d'inspection. L'évaluation de cette évolution pourrait être basée sur le suivi et la projection des paramètres de distributions probabilistes dans le temps.

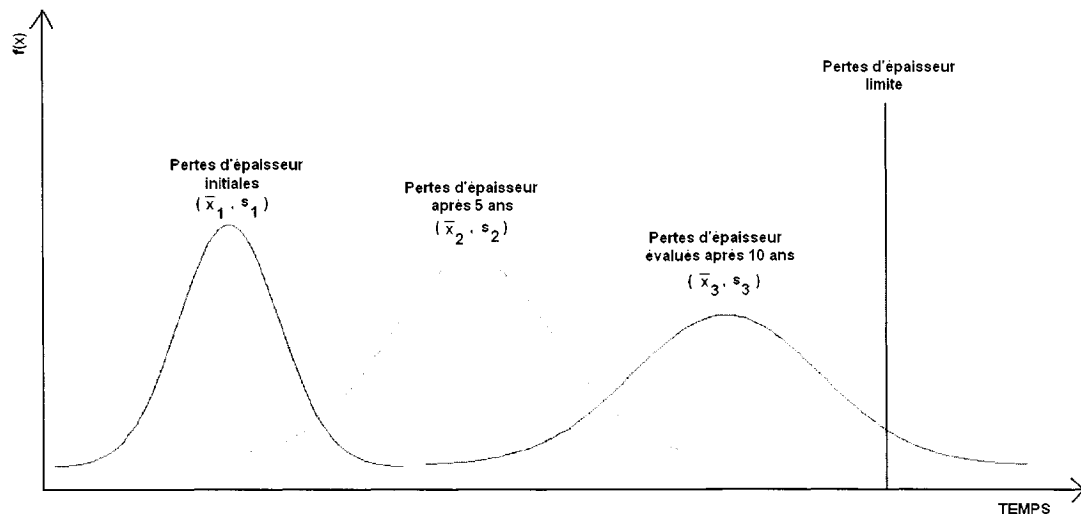


Figure 3.2 : Évolution de la corrosion représentée à l'aide de lois normales

La littérature scientifique regorge aussi de plusieurs travaux qui traitent de l'étude statistique de la corrosion par le biais des pertes de matières engendrées ou de la morphologie des défauts générés. Certaines normes, telles que celles présentées par la société américaine de normalisation et des matériaux [ASTM] (2002a, 2002b) pointent vers l'utilisation de techniques statistiques basées sur la distribution généralisée de valeurs extrêmes pour étudier le phénomène de la corrosion par piqûres. Ce type de méthode est très semblable à la technique de Weibull décrite au paragraphe précédent. En effet, il s'agit d'identifier une distribution représentant le plus fidèlement les données observées. Dans ce cas, le paramètre étudié est la profondeur des piqûres observées et chaque profondeur est liée à une probabilité. Cette distribution permet aussi, à partir d'un échantillon de profondeurs de piqûres donné, de supposer la présence de piqûres plus profondes et d'en évaluer le nombre. Il est toutefois important de mentionner que cette distribution se base sur des maximums (ou minimums) observés dans un espace

d'échantillonnage donné. Ce type de distribution est donc très utile, car il permet d'aider la caractérisation d'un mode de corrosion difficile à détecter, mais il ne permet pas la représentation de toutes les données. Il faut aussi ajouter que les dépendances au temps et aux aires analysées sont difficiles à modéliser.

Comme les normes se basent normalement sur des travaux scientifiques antérieurs, il n'est pas surprenant de retrouver plusieurs ouvrages qui font référence à l'utilisation des valeurs extrêmes afin de décrire la corrosion par piqûres. Les travaux de Laycock, Cottis et Scarf (1990) et de Laycock et Scarf (1993) semblent indiquer que ce type de distribution s'applique généralement bien à la profondeur de piqûres de corrosion. Ils ajoutent toutefois que certains modèles statistiques de valeurs extrêmes, tel que le « Joint Generalized Extreme Value Distribution », semblent bien expliquer le comportement d'extrêmes (piqûres) mesurés sur différentes unités expérimentales (différents coupons, aires d'essais, etc.). Toutefois, l'évaluation de la progression des piqûres dans le temps est une procédure complètement dissociée qui est beaucoup plus complexe et beaucoup moins précise. En effet, la présence d'interactions entre diverses variables génère une dépendance entre les mesures de profondeur et les aires d'échantillonnage employées. De plus, il est possible que ces interdépendances varient dans le temps.

Les travaux de Strutt, Nicholls et Barbier (1985), qui précèdent ceux de Laycock, Cottis et Scarf (1990) et de Laycock et Scarf (1993), traitent aussi de l'utilisation d'un modèle de valeurs extrêmes de type I (Gumbel) afin de représenter le phénomène de corrosion par piqûres. La modélisation, effectuée grâce aux paramètres de la distribution, semble bien expliquer les observations expérimentales. Les résultats qu'ils obtiennent indiquent aussi qu'aucun autre modèle statistique, à l'exception de ceux basés sur les extrêmes, ne peut efficacement corréler les données provenant de piqûres de corrosion. Les travaux de Strutt, Nicholls et Barbier (1985) montrent en effet que plusieurs profils de distributions fort différents sont obtenus suite à l'observation et à la

quantification globale d'un tel phénomène. Certaines distributions (mesures de profondeurs) étaient mêmes parfois caractérisées par deux modalités. Les travaux de ces chercheurs montrent aussi qu'il est possible de modéliser l'évolution des paramètres de la distribution dans le temps à l'aide de techniques de régression. Ces modèles peuvent donc s'avérer des plus intéressants à considérer dans le cadre du développement du logiciel Corroplus. Une fois un signal identifié, représentant des épaisseurs de parois résiduelles ou certaines morphologies typiques de corrosion dans des radiographies, ce type de modèle pourrait être employé afin de générer des modules de prédictions et d'analyses de résultats. Les équations 3.3, à 3.5 montrent la fonction cumulative et de densité qui peuvent être employées afin de caractériser la corrosion par piqûres.

$$\text{Équation 3.3 : } F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k(x-\mu)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\}, \text{ pour } kx \leq \alpha + \mu k$$

$$\text{Équation 3.4 : } F(x) = \exp \left\{ - \exp \left[\frac{-(x-\lambda)}{\alpha} \right] \right\} \text{ (lorsque } k = 0, \text{ distribution « Gumbel »)}$$

Où $F(x)$ est la distribution cumulative extrême de type Gumbel, x est la profondeur de piqûres extrêmes, α et λ sont des paramètres statistiques caractéristiques de la distribution. Notons que la forme de cette distribution est très similaire à celle d'une normale.

$$\text{Équation 3.5 : } f(x) = \left(\frac{1}{\alpha} \right) \exp \left\{ \left[\frac{-(x-\lambda)}{\alpha} \right] - \exp \left[\frac{-(x-\lambda)}{\alpha} \right] \right\}$$

Où $f(x)$ est la fonction de densité de la distribution Gumbel.

Ces fonctions (équations 3.2, 3.3, 3.4 et 3.5) peuvent être à la base de plusieurs calculs qui fournissent une évaluation de l'état de la structure en fonction d'un risque donné ou d'une aire totale exposée. Dans le premier cas, il est possible de considérer la fonction cumulative, $F(x)$ (équation 3.4), qui représente la probabilité d'obtenir une

profondeur inférieure ou égale à une profondeur d'attaque x donnée. En effectuant une soustraction, $1 - F(x)$, on obtient le risque r , d'avoir une piqure de profondeur supérieure à x dans l'installation considérée. Deux techniques peuvent ici être considérées. Premièrement, il est possible d'évaluer une profondeur maximale de piqure observable pour un niveau de risque donné. Dans ce cas, il faut appliquer deux logarithmes naturels, pour retrouver l'équation 3.6. On pose ensuite $R = -\ln(-\ln(1-r))$ et on fixe le niveau de r désiré. Par exemple il est possible de poser un niveau de confiance de 95% ($r = 0,05$) et d'obtenir un R de 2,97. Donc, pour un tel niveau de confiance, x devrait montrer une profondeur maximale de $(2.97\alpha + \lambda)$ unités. Il ne reste plus qu'à vérifier si cette profondeur dépasse un maximum e_{max} , établi en fonction d'une installation donnée. Il est aussi possible de procéder par la méthode inverse, soit calculer $F(x)$ en fixant la variable x à e_{max} . Une fois $F(x)$ obtenu, il devient possible de calculer r et de vérifier si la probabilité de retrouver une piqure plus profonde que e_{max} constitue un risque acceptable. Il est à noter que les paramètres de la distribution, α et λ , sont évalués à partir des données d'observations tel qu'expliqué dans le cas d'une distribution de type Weibull.

$$\text{Équation 3.6 : } -\alpha \ln(-\ln(1-r)) = x - \lambda$$

Toujours dans le domaine des extrêmes, Shibata (2000) démontre l'utilisation une technique de type « pointeur » afin d'arriver à extrapoler la profondeur maximale observable à partir de données d'échantillonnage. Cette technique se base premièrement sur l'équation 3.7 où i représente la position d'une mesure (ordonnée en ordre décroissant) et N , le nombre total d'échantillons d'aires égales qui ont été recensés. Il est aussi possible de considérer le rapport de surface analysée, T (voir équation 3.8), où S est la surface totale à analyser et s est la surface inspectée (de manière aléatoire). Il est donc possible de définir T par l'équation 3.9. Rappelons ici que, dans ce cas, on définit y par l'équation 3.10 alors que $F(y)$ est défini par l'équation 3.11. La notion de confiance précédemment utilisée est donc ici remplacée par un rapport de surface. Comme il est

possible d'identifier un $F(y)$ correspondant à un T donné, il devient possible d'extrapoler un y et donc, d'évaluer une profondeur de piqûre maximale (les piqûres les plus profondes qui peuvent être retrouvées dans tout le système de conduites) en fonction de piqûres échantillonnées sur une aire donnée. Notons que, selon Shibata, ce type d'approximation n'est valable que pour $T > 18$. Ajoutons finalement que cette technique peut être considérée comme une variante du calcul de niveau de confiance mentionné au paragraphe précédent et peut s'avérer intéressante à intégrer dans le cadre du développement du logiciel Corroplus. Le rapport T pourrait aussi être effectué en fonction de la surface de film utilisée lors d'une inspection par rapport à une évaluation de la surface totale qu'aurait nécessitée l'étude intégrale de l'installation.

$$\text{Équation 3.7 : } F(y) = 1 - \left(\frac{i}{1 + N} \right)$$

$$\text{Équation 3.8 : } T = \left(\frac{S}{s} \right)$$

$$\text{Équation 3.9 : } T = \left(\frac{1}{1 - F(y)} \right)$$

$$\text{Équation 3.10 : } y = \frac{x - \lambda}{\alpha}$$

$$\text{Équation 3.11 : } y = -\ln(-\ln(F(y)))$$

Les travaux de Vajo, Wei, Phelps, Reiner, Herrera et Cervantes (2003) concernent aussi le succès des techniques statistiques dans l'explication de phénomènes de corrosion localisée observés dans divers types d'acier et d'alliages aluminium. Ils n'étudient cependant pas la corrosion par piqûres; leurs travaux se concentrent plus spécifiquement sur la corrosion caverneuse. Leurs expérimentations consistent en l'étude de plusieurs types de joints d'étanchéité appliqués sur une base d'aluminium afin de simuler un phénomène de corrosion particulier et de l'étudier. Ils immergent leurs montages dans des solutions agressives et analysent ensuite le profil de corrosion sous le

joint (zone de corrosion caverneuse). Ces auteurs de l'article basent leurs mesures sur des échantillons linéaires bidimensionnels. En effet, ces derniers étudient des profils d'épaisseurs le long de coupes. Ils séparent ensuite les segments de mesures en dix parties égales et en tirent les pertes les plus importantes par segment. Ils observent donc 10 points par coupe. Ils ont répété la même expérience en séparant les lignes en 5 et 20 sections. Les résultats qu'ils obtiennent sont très encourageants, car les profils linéaires employés peuvent être représentés par des statistiques extrêmes. Les auteurs semblent aussi montrer que la longueur des segments employés n'influence que légèrement les réponses obtenues. Toutefois, cette observation est difficilement applicable à d'autres mécanismes, car la réponse elle-même (mesures d'épaisseurs) varie très certainement en fonction de la morphologie de corrosion étudiée. Cependant, les procédures basées sur les distributions extrêmes semblent être très flexibles et adaptables à plusieurs types de situations. D'autres mécanismes de dégradation, tel que la corrosion par hydrogène (hydrogen grooving), pourraient être représentés par les extrêmes. L'idée de baser un indice de sévérité sur un risque calculé à partir de modèles probabiliste semble donc de plus en plus intéressante, car ces distributions peuvent s'adapter à plusieurs modes de dégradation.

Les travaux et études d'un autre auteur (Barringer 1997a, 1997b, 2001) montrent l'utilisation des concepts et modèles statistiques, tel que décrits précédemment dans cette section, dans le cadre de décision de gestion industrielle. La plupart de ses travaux utilisent en effet la modélisation statistique de phénomènes de corrosion afin d'en prévoir le comportement futur. Il emploie fréquemment les distributions de valeurs extrêmes généralisées afin de décrire le comportement de piquûres. Plus précisément, il emploie les distributions de Weibull afin de représenter les parois les plus minces qui ont été inspectées. Dans plusieurs cas, les mesures d'épaisseur de parois sont réalisées par ultrasons. Les modélisations qu'il effectue lui permettent de calculer le risque d'opération, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence d'un événement multiplié par les coûts engendrés par ce dernier. Notons que des modèles plus complexes peuvent

toutefois être établis afin de bien représenter des conditions industrielles plus réalistes. Cependant, Barringer peut quantifier, par le biais de modèles statistiques, tous les paramètres nécessaires à la réalisation d'études de structures industrielles. Les modèles statistiques précédemment présentés sont donc bien connus et appliqués en industrie.

Les distributions de probabilités pourraient donc être employées dans le calcul d'indices de sévérité par l'évaluation de niveaux de probabilités ou du risque de dépasser une épaisseur fixée. Il serait aussi possible de suivre les paramètres des distributions dans le temps. Cependant, une tendance semble se dessiner au niveau de l'utilisation de ces fonctions. En effet, ces dernières demandent une connaissance des mécanismes en cours afin de bien représenter les données mesurées. Le fait de baser Corroplus uniquement sur des mesures de parois résiduelles risque de poser un problème car de telles données ne précisent pas directement les mécanismes de corrosion en cours dans les conduites. Le problème de classification de la corrosion en fonction des épaisseurs mesurées devient encore plus complexe en présence de corrosion mixte c'est-à-dire, lorsque plusieurs mécanismes de dégradation ont lieu simultanément. Ce sont là des raisons qui appuient la nécessité d'identifier les mécanismes de corrosion à partir des fonds d'images. Une fois les défauts identifiés et leurs caractéristiques isolées, il devient possible d'appliquer le modèle statistique approprié et d'évaluer l'indice de sévérité à partir d'un niveau de risque calculé. L'analyse des fonds d'images pourrait donc être la clef qui permet de déterminer adéquatement l'indice de sévérité de la corrosion.

L'utilisation de données provenant d'images bidimensionnelles peut aussi permettre de calculer d'autres indices utiles à la caractérisation de la corrosion et donc, à la détermination de la sévérité. Par exemple, les travaux de Shibata (2000) montrent qu'il est possible d'utiliser une distribution de Poisson afin de paramétrer des distributions bidimensionnelles de piqûres. Ce type de distribution est simplement basé sur un nombre de piqûres observées pour un échantillon d'aire donnée. Par exemple, il serait possible de diviser une radiographie en 10 régions et d'y compter des piqûres. Les

écarts à cette distribution théorique peuvent être considérés comme engendrés par des arrangements non uniformes de piqûres. Ceci se traduit en l'observation d'un plus grand nombre de piqûres dans certaines régions. Ces derniers peuvent être caractérisés à l'aide de deux fonctions soit : la distribution spatiale observée (H , voir équation 3.12) et une distribution de Poisson parfaite (H_0 , voir équation 3.13). Une distribution similaire est aussi utilisée dans les travaux de Laycock, Cottis et Scarf (1990) et de Laycock et Scarf (1993), où il est mentionné que le dénombrement de profondeurs de piqûres, dépassant un certain seuil, peut obéir à une loi de Poisson ou encore à une loi de Pareto.

$$\text{Équation 3.12} : H = \sum_{j=1}^N \left(\frac{q_j}{q_t} \right) \ln \left(\frac{q_j}{q_t} \right)$$

Où q_j ($j = 1, 2, 3, 4, \dots, N$) est le nombre de piqûres observées dans la $j^{\text{ème}}$ aire analysée
Et q_t est le nombre total de piqûres observées dans toutes les aires analysées.

$$\text{Équation 3.13} : D = H - H_0$$

Où H_0 provient des q_j d'une distribution de Poisson théorique.

Ce type de fonction pourrait donc être employée afin de caractériser des « agglomérations » et de situer des zones où la dégradation est plus critique. Elle pourrait être employée afin de pondérer l'indice de sévérité, les zones agglomérées voyant leurs indices augmenter.

Plusieurs autres auteurs ont aussi développé des techniques très intéressantes et très utiles. Cependant, la description de ces dernières alourdirait inutilement ce travail; ces techniques seront donc très brièvement commentées. Certains auteurs comme Rust et Johnson (2001) traitent d'une méthode permettant d'identifier les sites de corrosion actifs à partir de données ultrasonores provenant d'inspections par « pig » à l'intérieur de pipeline. Ils utilisent des techniques de régression afin de relier les données d'observations à des distributions d'extrêmes et fixent des seuils critiques qui sont

établis par régression. Les travaux de Tow et Reuter (1998) traitent de la non détection des défauts. Puglisi, Hay et Mustafa (1979) considèrent les effets des réparations ainsi que ceux de la non détection. Ce type d'étude peut grandement aider lors d'extrapolations basées sur les erreurs et les imprécisions des méthodes non destructives employées. La connaissance des erreurs de détection permettrait de fixer un intervalle (ou une distribution) représentant les épaisseurs limites. La limite de pertes d'épaisseur fixe, telle que schématisée aux figure 3.1 et figure 3.2, se verrait donc transformée en une distribution et ce pour compenser les erreurs de mesures dues aux techniques d'inspections employées.

Mentionnons aussi que plusieurs autres techniques de modélisation, reliées aux bris et à la corrosion de systèmes, peuvent être identifiées. Cependant, ces techniques ne seront pas traitées en détails puisque de telles modélisations dépendent grandement des procédés étudiés. Toutefois, le caractère de certains travaux sera mentionné dans cette section afin de donner une idée des possibilités offertes par de telles modélisations. Par exemple, De Jesus et Neto (2002) traitent de méthodes déterministes et probabilistes, permettant de caractériser la détérioration des propriétés mécaniques au niveau de tuyaux de générateur de vapeur. Dawson, Race, Peet et Krishnamurthy (2001) utilisent, quant à eux, des méthodes déterministes, statistiques et probabilistes afin d'évaluer et de quantifier l'état de pipelines. Harlow et Wei (1998) montrent aussi l'utilisation de distributions statistiques à l'intérieur de modèles probabilistes qui permettent de caractériser la croissance de piqûres dans des alliages d'aluminium immergées en milieux aqueux. Kelly, Scully, Altynova et Peeler (2001) utilisent une distribution de Weibull afin de modéliser les distributions d'épaisseurs retrouvées sur une pièce. Ils modélisent aussi l'évolution de la surface corrodée dans le temps à l'aide de méthodes Monte-Carlo. De tels exemples montrent bien à quel point une bonne prise de données au niveau des conduites corrodées est importante. De bons protocoles d'acquisition de résultats permettent en effet le développement de techniques d'évaluations très puissantes.

En bref, il est possible de mentionner que les approches à caractères statistiques présentent plusieurs avantages quant à leur utilité dans le processus de quantification des mécanismes de corrosion. En effet, celles-ci rendent possible le suivi de plusieurs caractéristiques reliées à des mécanismes de dégradation bien précis et peuvent être à la base de protocoles de quantification de la sévérité de corrosion très efficaces. La sévérité pourrait être évaluée à partir d'un risque probabiliste fixé par les utilisateurs. Par exemple, un client pourrait désirer baser ses décisions sur un risque de 5%. Plus les mesures « s'approchent » de ce risque et plus leur sévérité devient grande. Une sévérité serait aussi calculée pour toutes les radiographies effectuées. Favorisant ainsi le classement par sections (et par mécanismes de corrosion). Des facteurs de pondération de l'indice de sévérité pourraient être développés pour caractériser l'effet des mécanismes de dégradation ainsi que la localisation de la corrosion. Cette pondération viserait à compenser les incertitudes engendrées par les mécanismes plus difficiles à repérer et à suivre telle que la corrosion par piqûres. Cependant, pour utiliser tous ces modèles, il est nécessaire de bien associer les pertes d'épaisseurs aux mécanismes de corrosion à caractériser. C'est pourquoi ce travail se concentre sur l'étude des fonds d'images de radiographies, car cette zone permet une telle association.

3.2 Application de l'électrochimie à la corrosion

Comme les principales théories de bases en électrochimie ont été exposées à la section 2 de ce document, il devient possible de présenter les diverses expérimentations ayant été réalisées dans le domaine de la corrosion. Le but de cette section est d'identifier un maximum de couples de matériaux et d'électrolytes générant des taux de dégradation élevés afin d'obtenir des conduites corrodées pouvant être radiographiées. La production de deux mécanismes de corrosion est étudiée à cette section soit : la corrosion généralisée et la corrosion par piqûres.

Les cas les plus intéressants touchant le premier mécanisme, la corrosion généralisée, sont tirés de tous les domaines qui impliquent l'utilisation d'acide sulfurique. Des auteurs tels que Brubaker (1987), Salvago, Magagnin et Bestetti (2002) ainsi que Alfonsson, Coates et Olsson (1999) ont remarqué que divers aciers inoxydables ainsi que les aciers au carbone étaient fortement attaqués par l'acide sulfurique de moyenne concentration. En effet, ces chercheurs ont observé des taux de dégradation largement supérieurs à 10 mm par an lorsque ces aciers étaient exposés à des acides dont la concentration variait entre 20% et 60% volumique. Des attaques sévères étaient observées à des températures aussi faibles que 25°C. De plus fortes températures peuvent toutefois engendrer des taux de corrosion beaucoup plus sévères. Notons aussi que la vitesse d'agitation peut grandement influencer les taux de corrosion, autant au niveau des aciers inoxydables que des aciers au carbone. En effet, Moniz et Pollock (1986) ont observé que l'acier au carbone était protégé par une couche de sulfate relativement fragile. Cette dernière se dilue aisément dans un acide dont la concentration se trouve sous les 98%, d'où la faible résistance des aciers bas carbone à ce type de solution. De plus, la couche se détruit très facilement lorsque la vitesse d'écoulement devient trop grande ou lorsqu'il y a présence de turbulence. En mode actif, de fortes vitesses d'agitation contribuent toutefois à diminuer les taux de corrosion au niveau des aciers au carbone. Przewlocka et Bala (1981) ainsi que Natesan, Venkatachari et Venkatakrishna (1993) ont en effet observé qu'une réaction limitante pouvait prendre de l'importance à de fortes vitesses d'écoulement et stabiliser, voire même diminuer, les taux de dégradation.

Par ailleurs, les aciers inoxydables austénitiques deviennent sensibles à la vitesse d'agitation lorsqu'ils sont actifs. Dans le domaine passif (gamme de concentrations et de températures précises), il est plus rare qu'une grande vitesse d'écoulement provoque l'activation de mécanismes de corrosion. Cependant, ce paramètre prend une toute autre importance lorsqu'un acier inoxydable se trouve dans le domaine actif. Dans ce cas et au moment de la transition passive-active, plusieurs auteurs ont observé une variation de la

composition de la couche protectrice (Frini et El Maaoui 1992, Kirchheim, Heine, Fischmeister, Hofmann, Knote et Stolz 1989, Normand, Pierre et Pagetti 1995). Cette dernière s'enrichit en chrome et en nickel en début de la réaction enrichissant par le fait même la solution en ces deux éléments. À ce point, la vitesse de dégradation demeure relativement faible. Elle atteint ensuite un maximum lorsque les taux de dissolution du fer, du chrome et du nickel se trouvent stabilisés. Il est probable qu'une grande vitesse d'agitation contribue à repousser le point de transition (d'une attaque généralisée faible à une attaque agressive) dans le temps. Une hausse de la température permet d'augmenter significativement les taux de dégradation ainsi que d'accélérer l'arrivée du pallier de corrosion généralisée agressive.

Plusieurs études ont aussi été réalisées dans le but de quantifier la corrosion par piqûres. Tel que mentionné précédemment, ce type de corrosion est un phénomène très néfaste et difficilement repérable. Certains couples matériaux-électrolytes sont aussi très susceptibles de donner naissance à ce type de mécanismes. En effet, des études sur des aciers inoxydables austénitiques démontrent que ceux-ci sont très susceptibles de développer des piqûres de corrosion lorsqu'ils sont exposés à des solutions riches en ions chlorure. La présence d'oxydants forts, couplés à des réducteurs puissants, favorise aussi l'apparition de ce type de mécanisme de corrosion. Plusieurs auteurs ont donc identifié le chlorure ferrique ou le chlorure ferrique hydraté (FeCl_3 ou $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) comme des ingrédients idéaux permettant de générer de la corrosion sévère par piqûres au niveau d'aciers inoxydables austénitiques (ASTM Standards 2002c, 2002d, 2002e, Salvago, Fumagalli et Sinigaglia 1983a, 1983b, Salvago, Magagini et Bestetti 2002, Fujimoto, Shibata, Minamida et Udaka 1994, Williams, Westcott et Fleischmann 1984). Des solutions de 6% FeCl_3 (massique) et 1% HCl (volumique) sont très souvent suggérées afin d'étudier le phénomène. Toutefois, ces mêmes auteurs mentionnent que ce type de mécanismes engendre une forte variabilité au niveau des profondeurs corrodées ainsi que du nombre de piqûres générées. Il faut aussi ajouter que la température et la vitesse d'agitation sont des paramètres importants dans le cas de ce

mécanisme de corrosion. L'acide chlorhydrique (HCl) contribue aussi à favoriser l'apparition de piqûres.

3.3 L'analyse numérique de radiographies industrielles

Il existe plusieurs travaux qui touchent l'analyse numérique de films radiographiques. Plusieurs d'entre eux sont notamment répertoriés par l'organisme NDT.net (<http://www.ndt.net>). Notons ici que les travaux mentionnés à cette section concernent plus spécifiquement l'analyse de conduites. Les objets de géométries plus simples, tels que des plaques, s'analysent plus facilement par le biais de modélisations géométriques. Des auteurs, tels que Lee et Jang (2001) traitent de techniques potentielles d'analyses de fonds d'images. Ces derniers se basent sur une technique de modélisation exponentielle des fonds d'images alors que des auteurs comme Schumm, Bremnes et Chassignole (2004) étudient l'application de techniques Monte-Carlo. D'autres chercheurs tels que Ong, Patel et Balasubramanyan (1997) se basent sur les phénomènes de diffraction des rayons X afin de caractériser la corrosion externe de tuyaux isolés. Notons que tous les travaux de recherche identifiés dans ce travail qui portent sur la caractérisation de conduites en service partagent la même caractéristique : ils nécessitent une connaissance poussée des paramètres de positionnement de la source et du film. Certains d'entre eux requièrent aussi des systèmes d'étalonnage et de positionnement de source bien précis. Malheureusement, de telles exigences s'appliquent difficilement au monde industriel. Le développement de méthodes d'analyses de fonds de radiographies plus flexibles, applicables aux conduites en service, possède donc des attraits scientifiques et industriels très intéressants. C'est donc le développement de telles techniques qui sera principalement mis de l'avant dans ce travail.

Finalement, il faut mentionner qu'il n'existe que très peu de travaux qui traitent de l'application de méthodes Monte-Carlo à des tuyaux neufs et qu'il n'en existe aucun pour les tuyaux corrodés. Cette méthodologie ne sera donc pas employée dans le cadre de ce travail de recherche afin de simuler des fonds de radiographies.

4 RETOUR SUR LA THÉORIE

Maintenant que les assises théoriques ont été bien développées, il devient possible de produire une méthodologie d'expérimentation complète. Cependant, avant de fournir une description des étapes à venir, il est essentiel de résumer tous les éléments qui ont été présentés dans les deux sections précédentes. Tout d'abord, rappelons le but de ce projet qui est d'identifier des données, ou signaux à mesurer, au niveau de conduites en service afin de permettre l'évaluation d'un indice de sévérité de corrosion. L'évaluation de cet indice ne sera toutefois pas effectuée dans le cadre de ce travail.

Tel que mentionné lors des sections précédentes, il serait fort intéressant de baser l'évaluation de la sévérité sur trois caractéristiques soit : la comparaison d'épaisseurs mesurées à des épaisseurs critiques, l'évolution des pertes de matière dans le temps et les mécanismes de corrosion repérés dans les conduites en service. Dans le premier cas, l'évaluation de l'indice de sévérité pourrait être basée sur le risque de dépasser une épaisseur critique fixée. Un suivi dans le temps pourrait aussi permettre l'extrapolation et la prédiction de sévérités futures. Ce calcul pourrait être basé sur l'évolution et l'extrapolation par régression des paramètres des distributions de probabilités. Finalement, la connaissance des mécanismes de corrosion pourrait être utilisée afin de pondérer à la hausse ou à la baisse l'indice de sévérité. Une corrosion localisée par piqûre favoriserait la hausse de l'indice alors qu'une corrosion généralisée engendrerait sa baisse. La reconnaissance des mécanismes de corrosion a aussi un rôle beaucoup plus important pour le logiciel Corroplus : elle permet l'utilisation de tous les modèles probabilistes précédemment identifiés. En effet, ces modèles requièrent la connaissance des mécanismes qu'ils doivent représenter afin d'être pleinement efficaces. Tel qu'expliqué lors des sections précédentes, les fonds d'images de radiographies contiennent toutes les informations qui permettent une telle reconnaissance. Toutefois, aucun protocole d'analyse n'a jusqu'à ce jour été présenté. Ce projet se concentre donc

sur l'élaboration d'un protocole d'analyse de fonds d'images permettant la reconnaissance et la classification des mécanismes de corrosion.

En ce qui a trait à la procédure de recherche, les deux sections précédentes ont confirmé les affirmations de la section 1.3. Tout d'abord, il apparaît peu probable que le projet puisse se réaliser à partir de données générées par méthodes probabilistes. Des simulations Monte-Carlo auraient pu être considérées afin de modéliser certains mécanismes de corrosion, car les données ainsi que les distributions statistiques requises pour réaliser de tels calculs sont disponibles et largement employées. Toutefois, les mécanismes de transferts d'informations d'une pièce radiographiée à un film sont encore, dans le cas des conduites, moins bien connus. Il est donc préférable d'opter pour la génération de structures corrodées par le biais de l'exposition de conduites à des électrolytes agressifs. Les sections 2.2 et 3.2 prennent donc énormément d'importance dans la réalisation de ce travail, car il est important, compte tenu de la sensibilité des méthodes radiographiques, de produire un protocole impliquant un milieu facilement contrôlable. De plus, l'utilisation directe de pièces industrielles n'est pas recommandée, car les premières étapes de la recherche portant sur l'étude de fonds d'images requièrent un bon contrôle des paramètres de radiographies. Des analyses en laboratoire permettent d'isoler plus facilement les divers facteurs et d'en étudier les influences sur les résultats obtenus. Tel que mentionné à la section 1.3, le prochain chapitre est consacré au développement d'une méthodologie de tests de corrosion accélérés. Par la suite, divers modèles représentant le processus de radiographie sont produits et étudiés (section 6). Une technique de modélisation de fonds d'image est aussi proposée à la même section. Finalement, le modèle proposé à la section 6 est étudié à l'aide de techniques statistiques afin de vérifier s'il représente fidèlement les données de fonds d'images (section 7).

5 ESSAIS DE CORROSION

Cette section concerne les divers essais de corrosion réalisés pour obtenir les couples matériaux-électrolytes générant des modes de dégradation bien précis. On vise à obtenir trois états de conduites distincts, l'un d'entre eux étant l'état « non corrodé ». Les essais réalisés dans cette section mènent donc à la génération de deux mécanismes de corrosion distincts à l'intérieur de conduites. Ces mécanismes sont la corrosion généralisée et la corrosion localisée par piqûres. La génération de corrosion localisée aux soudures est aussi explorée.

En premier lieu, trois types d'essais préliminaires (étude de coupons de corrosion) ont été réalisés afin d'identifier des couples matériaux-électrolytes idéaux. Ceux-ci sont traités en détails aux sections 5.1 et 5.2. La première section concerne les essais réalisés à l'aide d'acide sulfurique alors que la seconde concerne ceux ayant été exécutés à partir de chlorures. En fonction des données présentées aux sections 2.2 et 3.2, un seul matériau a été sélectionné et il s'agit de l'acier inoxydable AISI 304L. Ce dernier est employé afin de réaliser tous les essais de corrosion de cette section. Les résultats des essais préliminaires ont permis le développement et la réalisation d'essais sur des sections complètes de tuyaux, le but de cette seconde série d'essais est d'obtenir des conduites corrodées pouvant être radiographiées. Des essais préliminaires sont tout d'abord réalisés sur certaines sections de tuyaux (voir section 5.3). Ceux-ci permettent de bien fixer les conditions à employer lors d'essais longs termes et de fournir les premiers échantillons pouvant être inspectés en laboratoire. En dernier lieu, un protocole final d'essais de dégradation accélérée est établi. Celui-ci est présenté à la section 5.4.

5.1 Essais préliminaires réalisés à l'aide d'acide sulfurique

Cette section porte sur la détermination des conditions à employer afin de générer deux types de mécanismes de corrosion sur des échantillons d'acier inoxydable AISI 304L. Il s'agit ici de la corrosion généralisée et de la corrosion localisée aux soudures. Tous ces essais sont réalisés à l'aide d'acide sulfurique et le but de cette section est de déterminer la concentration de solution idéale à utiliser afin de produire une dégradation rapide tout en minimisant l'utilisation d'acide sulfurique. Les procédures employées lors de ces essais sont présentées à la section 5.1.1 et les résultats des essais sont compilés à la section 5.1.2.

5.1.1 Méthodologie expérimentale

Tel que mentionné précédemment, le matériau employé lors des essais est l'acier inoxydable AISI 304L. Il est disponible sous forme de tuyau ayant un diamètre de taille intéressante pour la réalisation d'essais (diamètre externe de 11,43 cm ou 4,5 pouces) ainsi qu'une forte épaisseur de paroi (0,635cm ou 0,25 pouce). Il est nécessaire d'obtenir des pièces aux parois épaisses afin d'éviter les perforations trop rapides. De plus, des pièces possédant des diamètres trop grands auraient requis des quantités plus importantes d'acides. Un seul type d'électrolyte a été considéré; il s'agit de l'acide sulfurique de moyenne concentration (entre 20 et 60% volumique). Les premiers essais ont tous été réalisés à partir de petites sections découpées au niveau du tuyau décrit plus haut. Ces dernières possèdent une forme de type rectangulaire (avec une certaine courbure) et dont l'aire exposée varie entre 28 cm² et 60 cm² (environ 4 à 10 pouces carrés). Les détails concernant ces essais sont expliqués aux paragraphes qui suivent.

La méthodologie employée lors de l'exécution des essais est basée sur un suivi de la perte de masse des échantillons dans le temps ainsi que sur des inspections visuelles. Une première série d'essais a été réalisée afin d'évaluer l'influence de la concentration en acide sulfurique. Les auteurs mentionnés à la section 3.2 semblent indiquer qu'une concentration d'environ 15% volumique est suffisante afin d'obtenir des taux de corrosion très importants (supérieur à 11 mm par an) à la température de la pièce (environ 20 à 25°C). Il est évident, dans le cadre de ce travail, qu'une concentration minimale est visée afin d'éviter d'utiliser une quantité trop importante d'acide. Six échantillons ont donc été découpés, passivés et ensuite exposés à deux acides sulfuriques dont les concentrations étaient de 15% et 30% vol respectivement. Le traitement de passivation consiste en une première étape de nettoyage à l'eau et à l'acétone. Par la suite, chaque échantillon a été exposé à trois solutions de traitements. La première est une solution chaude (70 à 80°C) de NaOH 5% massique. Le temps d'exposition des échantillons relié à cette première immersion est de 30 minutes. Une passivation est ensuite effectuée à l'aide d'une solution chaude de HNO₃ (20% vol, ayant une température variant entre 50 et 60°C) pour une durée de 30 minutes. Finalement, les échantillons sont retraités à l'aide d'une autre solution chaude (70 à 80°C) de NaOH (5% massique) pour une durée de 30 minutes. Chaque nouvelle immersion est précédée d'un nettoyage à l'eau. Suite à ce traitement, trois échantillons ont été exposés à un litre d'acide sulfurique 15% vol et trois autres ont été immergés dans un litre d'une solution dont la concentration est de 30% vol (voir figure 5.1). Notons aussi que la préparation des acides par dilution dans l'eau est une opération qui dégage beaucoup de chaleur. Les acides ainsi générés atteignent aisément leurs points d'ébullition. Des solutions chaudes ont donc été utilisées afin d'attaquer les échantillons lors des premiers moments d'exposition (température environnant les 70°C, suite à un refroidissement).

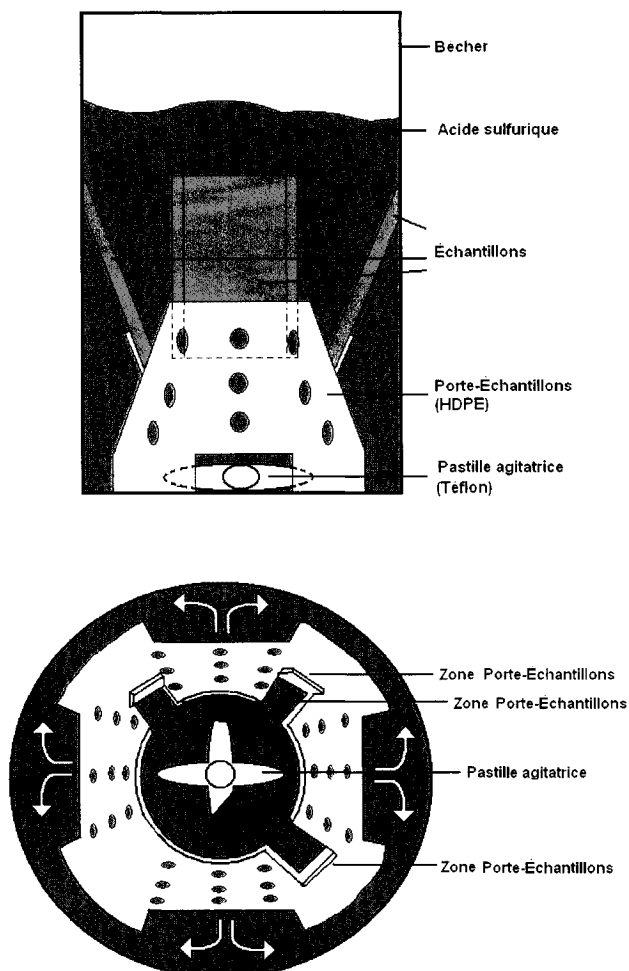


Figure 5.1 : Disposition schématisée des échantillons lors des essais

Suite à l'obtention des résultats des premiers essais (décrits au paragraphe précédent), d'autres tests sont effectués à l'aide d'une solution de concentration médiane (25% vol). Les modes de préparation des échantillons et de la solution demeurent les mêmes cependant, le nouveau protocole d'essais implique l'étude d'échantillons soudés. Quatre échantillons ont été produits afin de réaliser cette procédure et trois d'entre eux possèdent une soudure en leur centre. Les caractéristiques métallurgiques de ces dernières sont fournies au tableau 5.1. Le but des soudures est de générer une

dégradation accélérée sur la structure soudée ainsi que de la zone affectée thermiquement [ZAT]. Cette attaque peut être engendrée par le grand taux de carbone présent dans le matériau de soudure (supérieur à la matrice en AISI 304L), par un effet pile (soudures de type AISI 316 et AISI 310) ou une combinaison des deux phénomènes. L'essai a ici été effectué pour une durée de 18 jours et le poids des échantillons a été mesuré à intervalles réguliers. Notons que la couche corrodée n'a jamais été nettoyée lors de l'essai afin de ne pas altérer les mécanismes de dégradation.

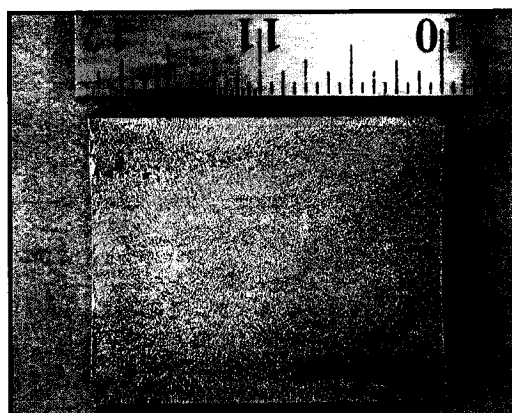
Tableau 5.1 : Caractéristiques des échantillons du deuxième essai

ÉCHANTILLONS	TYPE DE SOUDURE	MATÉRIAU DE BASE	MASSE INITIALE (g)	AIRE EXPOSÉE APPROXIMATIVE (mm ²)
AC SA	Type AISI 308	AISI 304L	121.68	5980.63 (9.27po ²)
AC SC	Type AISI 316	AISI 304L	116.40	5980.63 (9.27po ²)
AC SE	Type AISI 310	AISI 304L	137.50	5980.63 (9.27po ²)
AC SSH	Aucune	AISI 304L	129.35	5980.63 (9.27po ²)

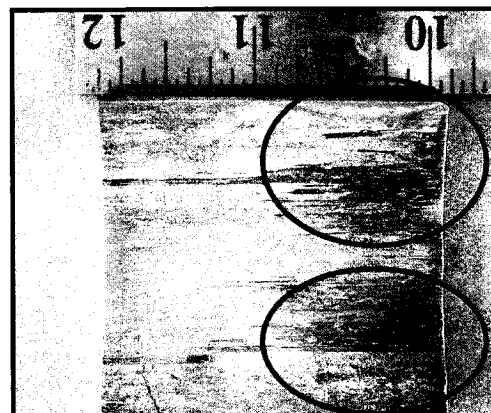
5.1.2 Résultats des essais

Les résultats de la première série d'essais, dont la durée a été de 7 jours, figurent aux tableaux 5.2 et 5.3 et à la figure 5.2. L'annexe 3 fournit aussi une comparaison entre l'état initial et l'état corrodé des échantillons. Notons que les divers taux de corrosion ont été calculés grâce à l'équation 5.1. Une faible agitation a été maintenue tout au long des essais afin d'uniformiser la composition des électrolytes. Le tableau 5.3 montre tout d'abord qu'une solution ayant une trop faible concentration ne permet pas l'obtention de résultats probants. En effet, un seul des trois échantillons montre la présence de corrosion active uniforme (échantillon F). Les autres échantillons ont tous montré des attaques plus localisées (voir figure 5.2, entouré en rouge). En ce qui a trait aux essais réalisés avec une concentration de 30% vol, les résultats fournis au tableau 5.2 sont très

prometteurs, car les taux de dégradation obtenus sont tous de l'ordre du centimètre par an. Cependant, il est possible que la localisation de la corrosion, observée au niveau des résultats provenant de la solution de plus faible concentration, soit due à la courte durée de l'essai.



Résultat typique d'une exposition à 30% vol



Résultat typique d'une exposition à 15% vol

Figure 5.2 : Comparaison entre deux échantillons des essais à 15 et 30% vol.

Tableau 5.2 : Caractéristiques des échantillons exposés à la solution 30% vol

	MASSE INITIALE (g)	MASSE FINALE (g)	PERTE DE POIDS (%)	AIRE DE SURFACE (mm²)	TAUX DE CORROSION APPROXIMÉ (mm par an)
A	85.77	75.19	12.33	2896.77 (4.49po ²)	21.21 (835mpa)
B	97.76	82.57	15.54	2896.77 (4.49po ²)	30.4 (1199mpa)
C	95.06	85.73	9.81	2896.77 (4.49po ²)	18.69 (736mpa)

Tableau 5.3 : Caractéristiques des échantillons exposés à la solution 15% vol

	MASSE INITIALE (g)	MASSE FINALE (g)	PERTE DE POIDS (%)	AIRE DE SURFACE (mm²)	TAUX DE CORROSION APPROXIMÉ (mm par an)
D	101.18	100.85	0.33	3290.32 (5.10po ²)	0.67 (26.2mpa)
E	103.50	103.40	0.10	3290.32 (5.10po ²)	0.20 (7.9mpa)
F	103.35	95.04	8.04	3290.32 (5.10po ²)	16.21 (638.3mpa)

$$\text{Équation 5.1 : } TC = \frac{534 \Delta m}{dAt}$$

Où TC est le taux de corrosion en mpa (millième de pouce par an), Δm la perte de masse en mg, d est la densité du matériau en g/cm³, A est la surface en po² et t est le temps d'exposition en heures.

Tel que mentionné précédemment, les autres essais réalisés impliquent l'étude d'échantillons soudés. Les résultats de ces essais figurent aux tableaux 5.4 et 5.5 ainsi qu'aux figures 5.4 et 5.5. La figure 5.3 présente une macrographie des échantillons ayant fourni les résultats les plus convaincants et l'annexe 4 expose toutes les autres macrographies des échantillons de cet essai.

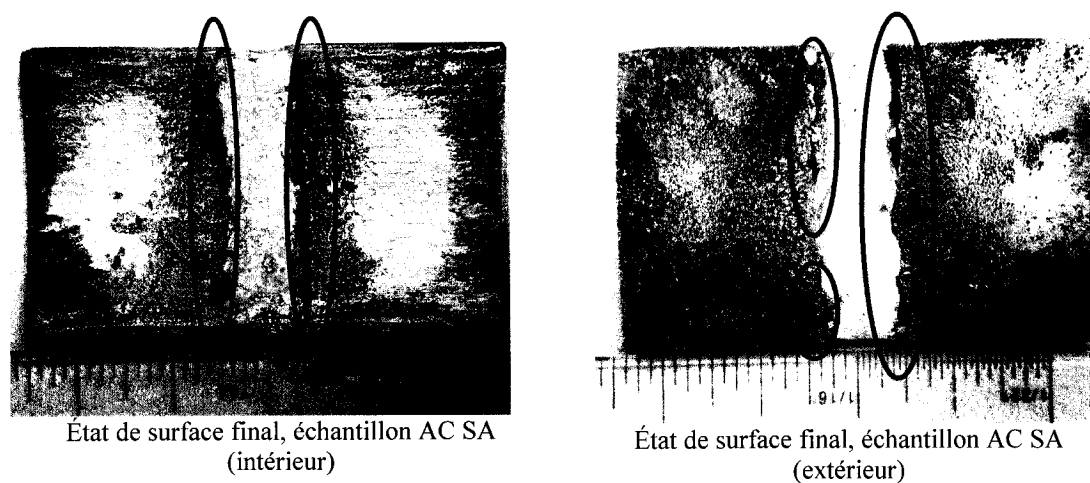


Figure 5.3 : Meilleur résultat de l'essai de corrosion aux soudures

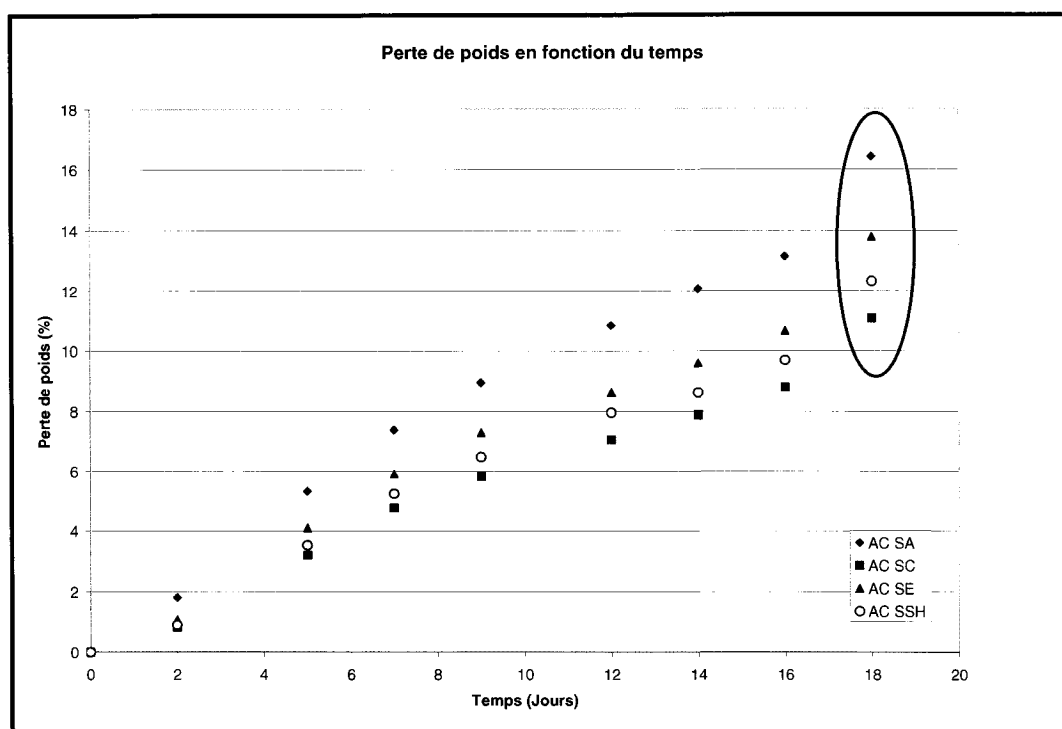


Figure 5.4 : Perte de poids des échantillons exposés à la solution 25% vol

Tableau 5.4 : Données relatives à la Figure 5.4

ÉCHANTILLON	PERTES DE MASSE (%)								
JOURS	0	2	5	7	9	12	14	16	18
AC SA	0	1.81	5.34	7.40	8.96	10.85	12.08	13.15	16.43
AC SC	0	0.82	3.20	4.77	5.83	7.07	7.89	8.79	11.09
AC SE	0	1.07	4.11	5.92	7.31	8.63	9.61	10.68	13.80
AC SSH	0	0.90	3.53	5.26	6.49	7.97	8.63	9.70	12.33

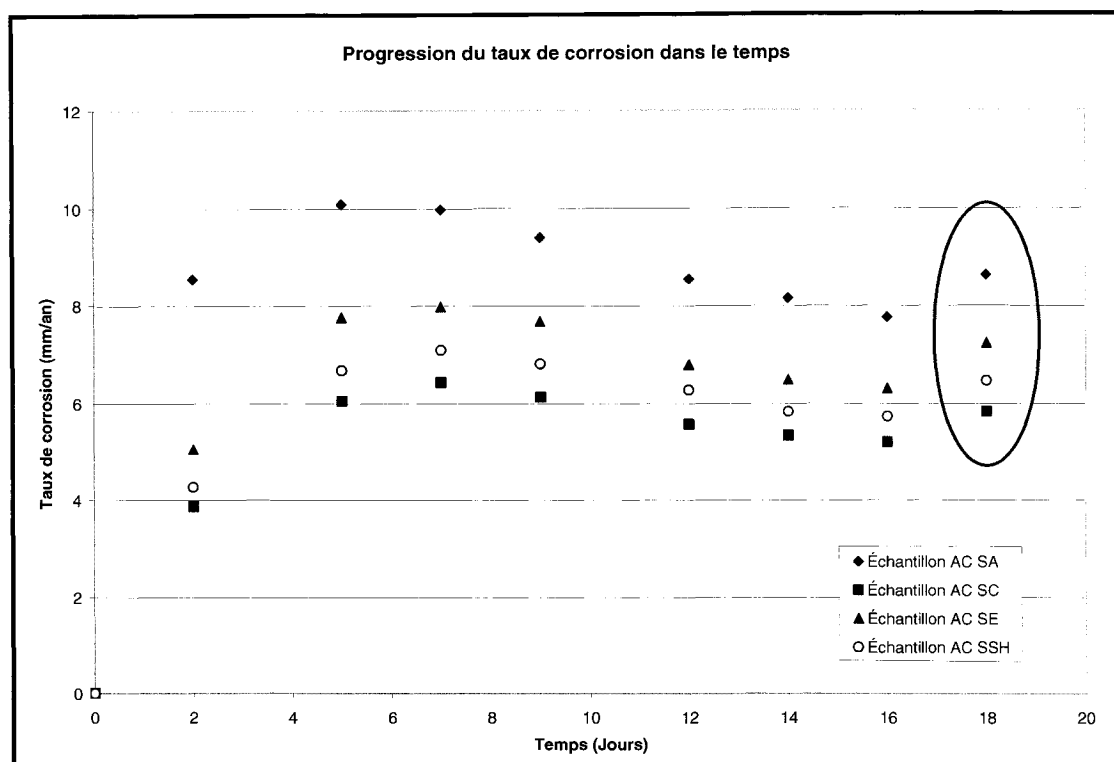


Figure 5.5 : Taux de corrosion des échantillons exposés à la solution 25% vol

Tableau 5.5 : Données relatives à la figure 5.5

ÉCHANTILLON	Taux de corrosion en mm par an (mpa)								
JOURS	0	2	5	7	9	12	14	16	18
AC SA	0	8.5 (336.3)	10.1 (397.5)	10.0 (393.1)	9.4 (370.3)	8.5 (336.3)	8.2 (321.0)	7.8 (305.8)	8.6 (339.7)
AC SC	0	3.9 (152.9)	6.1 (238.5)	6.4 (253.3)	6.1 (241.2)	5.6 (219.1)	5.3 (209.7)	5.2 (204.5)	5.8 (229.3)
AC SE	0	5.0 (198.7)	7.8 (305.8)	8.0 (314.5)	7.7 (302.4)	6.8 (267.5)	6.5 (255.5)	6.3 (248.4)	6.9 (284.0)
AC SSH	0	4.3 (168.2)	6.7 (263.0)	7.1 (279.6)	6.8 (268.4)	6.3 (247.2)	5.8 (229.3)	5.7 (225.5)	6.5 (254.8)

Les résultats obtenus sont bien clairs, l'acide sulfurique génère des pertes de matière importantes au niveau de pièces d'acier inoxydable en AISI 304L. En effet, grâce aux données du tableau 5.5, il est possible de s'attendre à des pertes d'environ $\frac{1}{2}$ millimètre par mois (0.197 pouce par mois) pour les conditions expérimentales employées lors de cet essai. Notons ici que l'augmentation des pertes, observée lors de la dernière prise de poids (zones en rouge, voir figures 5.4 et 5.5), est due au nettoyage des produits de corrosion. Cette dernière mesure représente donc plus fidèlement les pertes globales observées au niveau des échantillons. Il est aussi possible de remarquer qu'une soudure de type AISI 308 semble très attaquée et engendre des pertes beaucoup plus importantes que celles observées au niveau des autres échantillons. Les macrographies de la figure 5.3 et de l'annexe 4 confirment les pertes de poids observées. En effet, ce type de soudure génère une attaque importante au niveau de la ZAT et le cordon lui-même est aussi très attaqué. Ces structures de corrosion sont d'ailleurs aisément observables au niveau des macrographies. L'utilisation d'une soudure de type 316 semble avoir engendré un effet contraire à celui désiré. En effet, la soudure et la ZAT semblent toutes deux peu attaquées et les taux de corrosion observés restent inférieurs à ceux mesurés sur un échantillon non soudé. La soudure de type 310 fournit des résultats qui se situent entre une soudure de type 308 et un échantillon non soudé. De plus, les traces d'attaques sur les soudures de type 316 et 310 demeurent difficilement visibles à l'œil nu, ce qui n'est pas le cas des soudures de type 308.

En somme, les essais réalisés montrent qu'il est possible d'obtenir des taux de corrosion impressionnants lorsque des échantillons d'acier inoxydable sont exposés à des solutions d'acide sulfurique 15%, 25% et 30% vol. Toutefois, il semble que de grandes concentrations d'acide (supérieures à 25% vol) soient nécessaires afin d'obtenir une surface attaquée de manière uniforme. Il est aussi important de tenir compte de la contamination rapide des solutions employées. En effet, la rapidité de la dégradation causée par le contact des aciers avec l'acide sulfurique engendre une surcharge rapide

des solutions en produits de corrosion. Ceux-ci ont très probablement un effet non négligeable sur les taux de corrosion des aciers ainsi que sur les mécanismes de dégradation. Il est donc important de procéder à des changements fréquents de solutions afin d'éviter une baisse importante de la rapidité de la dégradation ainsi que l'apparition de nouveaux mécanismes de corrosion. Pour donner une idée de la fréquence de remplacement des solutions, celles employées lors des essais à long terme ont été changées toutes les deux semaines (voir section 5.3). Cependant, aucun changement d'acide n'a été effectué lors des essais mentionnés à cette section vue leur courte durée.

5.2 Essais préliminaires basés sur l'utilisation de chlorures

Cette section concerne les essais de corrosion localisée par piqûres. Tel que mentionné aux sections 2.2 et 3.2, les chlorures, ainsi que le HCl, peuvent rapidement engendrer des piqûres de corrosion au niveau de divers aciers inoxydables. L'utilisation de telles solutions est donc intéressante à considérer. Cette section se concentre sur la détermination de conditions expérimentales optimales menant à la génération de piqûres de corrosion repérables en radiographie à partir de solutions à base de chlorures.

5.2.1 Méthodologie expérimentale

Selon la norme ASTM G48-00 (2002), un alliage d'acier inoxydable de type AISI 304L devrait être attaqué à température de la pièce (20 à 25°C) par un électrolyte composé de 6% de FeCl_3 (massique) et 1% de HCl (vol). Plusieurs solutions, comportant ces deux éléments, ont donc été générées. Notons que la majorité de ces solutions comportent des concentrations moins importantes que celles spécifiées par la norme afin d'éviter de générer de profondes piqûres trop rapidement. Les divers paramètres qui caractérisent les essais figurent au tableau 5.6 et les solutions ont été générées à partir de chlorure ferrique hydraté, tel que proposé par la norme ASTM G48-00 (2002). Les

échantillons ainsi que la procédure employée afin de les nettoyer et de les exposer aux acides demeurent les mêmes que ceux mentionnés à la section 5.1.1.

Tableau 5.6 : Paramètres d'essais de corrosion par piqûres

Échantillons	Température (°C)	Concentration FeCl ₃ (% massique)	Concentration HCl (% vol)
1	20 à 25	1.0	0.0
2	20 à 25	1.0	1.0
3	20 à 25	2.0	0.0
4	20 à 25	2.0	1.0
5	20 à 25	4.0	0.0
6	20 à 25	4.0	1.0
7	20 à 25	6.0	0.0
8	20 à 25	6.0	1.0
9	30 à 40	6.0	1.0

5.2.2 Résultats des essais

Malheureusement, aucune des solutions n'a fournie de conclusion satisfaisante au niveau des échantillons et ce, malgré un mois complet d'exposition. En effet, la plupart des conditions employées généraient très peu de corrosion au centre des échantillons (voir figure 5.6 et annexe 5) et les zones attaquées en bordure sont moins représentatives, car ces dernières ont probablement été affaiblies par les opérations de découpage. Une élévation de température à environ 35 à 40°C engendre soit une perforation très rapide des échantillons ou aucune attaque. D'autres essais ont aussi été réalisés à l'aide de pièces de plus grandes tailles, mais sans grand succès. Ce mode de corrosion requiert probablement un temps d'exposition plus long afin de générer les structures désirées tout en ayant une progression stable. Les essais de corrosion par piqûres ne seront donc pas effectués par le biais de techniques électrochimiques, mais plutôt à l'aide de simulations par usinage.

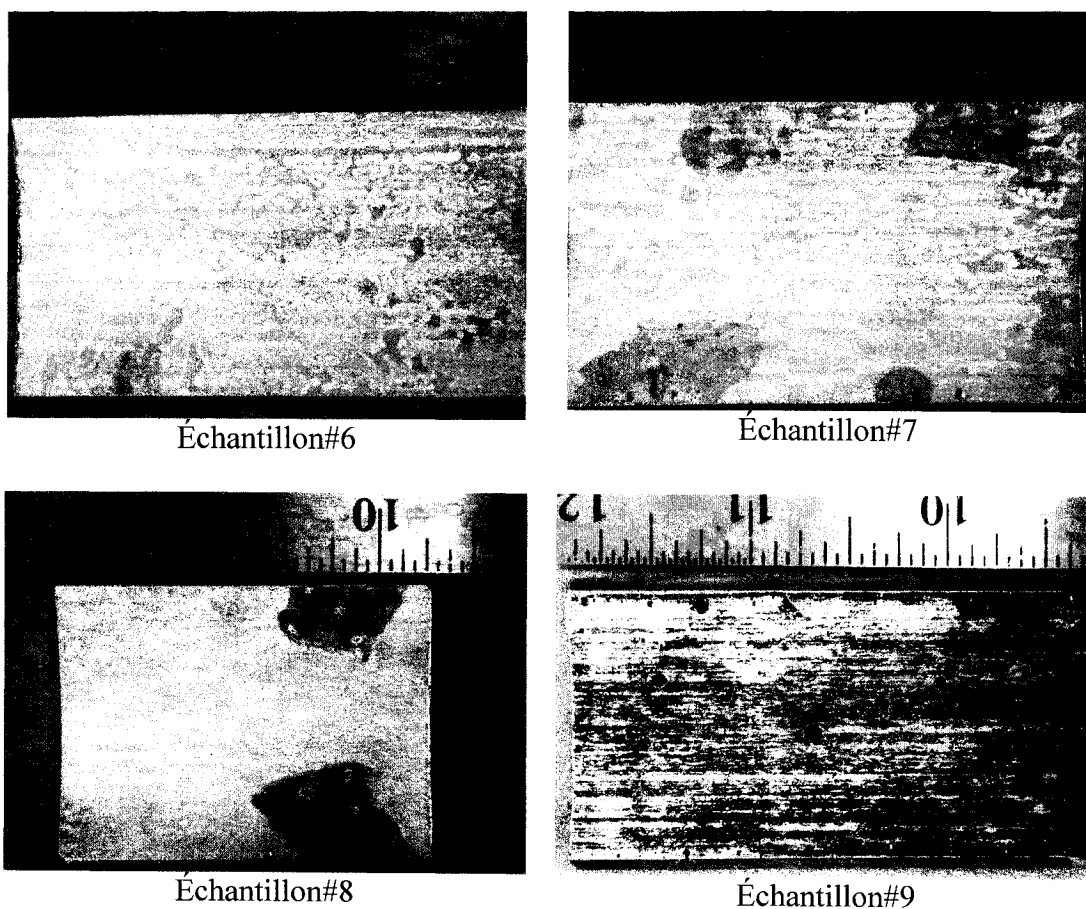


Figure 5.6 : Meilleurs résultats obtenus des essais de corrosion par piqûres

Afin de simuler le mécanisme de corrosion par piqûres, une section de tuyau est découpée en deux sur sa longueur. Les deux parties ainsi obtenues peuvent être perforées à diverses profondeurs à l'aide de mèches de diamètres variables. La figure 5.7 illustre très bien ce type d'échantillon. Une fois perforées, les deux demi sections sont assemblées et maintenues ensemble à l'aide de moyens mécaniques. Le tuyau peut donc être radiographié et les perforations qu'il contient vont permettre d'évaluer les effets de la corrosion par piqûres dans le cadre d'une analyse de fonds d'images.

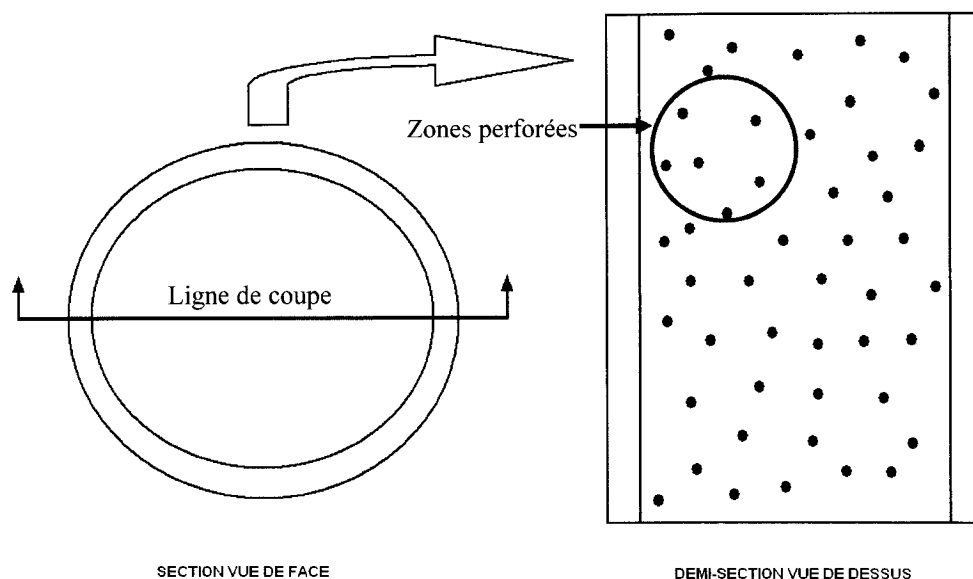


Figure 5.7 : Simulation de la corrosion par piqûres

5.3 Essais réalisés sur des sections complètes de tuyaux

Les essais expérimentaux à la section 5.1 ont permis de déterminer les diverses conditions à fixer afin de générer de la corrosion généralisée sur des échantillons d'acier inoxydable AISI 304L. Il est maintenant possible d'utiliser ces conditions afin de produire ce mécanisme de corrosion au niveau de conduites complètes pouvant être radiographiées. Quant à la section 5.2, elle a illustrée la difficulté de générer des piqûres de corrosion de manière stable sur de petits échantillons. Aucun protocole concernant ce type de corrosion localisée n'est développé, mis à part la génération de piqûres par méthodes mécaniques. En somme, cette section se concentre uniquement sur l'application des paramètres expérimentaux identifiés en 5.1.

5.3.1 Méthodologie expérimentale

Tel que mentionné précédemment, il est maintenant possible de réaliser des tests à plus grande échelle sur des sections complètes de tuyaux. La figure 5.8 illustre bien le montage employé afin de réaliser de telles expériences. Il s'agit de deux sections de tuyaux en acier inoxydable dont les caractéristiques ont été mentionnées à la section 5.1. Une des extrémités des sections est fermée à l'aide de bouchons en polyéthylène haute densité (HDPE). Notons que ce polymère ne possède pas la meilleure résistance aux conditions employées, mais ce dernier montre un comportement correct pour la courte durée requise par les essais. Ces bouchons ont été insérés par « pression ». La partie supérieure est scellée à l'aide de membrane de polyéthylène basse densité (LDPE) élastique et transparente. Une soudure de type AISI 308 a aussi été réalisée au centre des tuyaux afin de vérifier s'il est possible d'étudier la corrosion d'une telle structure par radiographie. Le montage est agité à la base à l'aide d'un duo pastille aimantée et plaque agitatrice. Le but de cette action est de maintenir la composition de l'électrolyte uniforme. Notons aussi que l'acide employé a été changé tous les 14 jours afin de préserver un électrolyte puissant et le moins contaminé possible. Des analyses par radiographie ont aussi été effectuées à tous les 28 jours. Lors de ces étapes d'inspection, les tuyaux étaient nettoyés à l'eau savonneuse, rincés à l'eau et puis nettoyés une fois de plus à l'aide d'acétone pour être finalement séchés. Un acide neuf est réintroduit suite aux étapes d'inspection et de nettoyage.

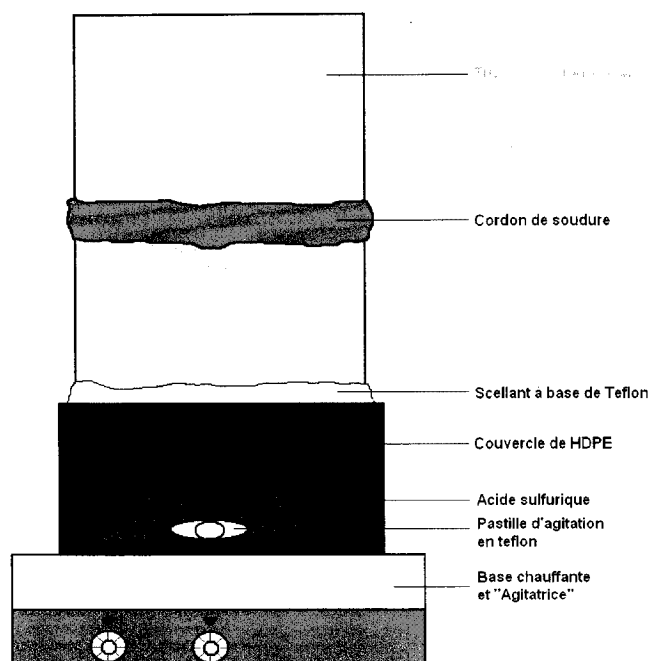


Figure 5.8 : Montage initial de corrosion généralisée accélérée

5.3.2 Résultats des essais

Les résultats d'un tel essai se sont montrés très concluants. Cependant, plusieurs modifications ont été apportées par rapport aux conditions initiales. Premièrement, l'utilisation d'un acide sulfurique de concentration inférieure à 50% vol s'est avérée inadéquate afin de générer les mécanismes de corrosion désirés. De plus, la température initiale de l'acide devait être d'au moins 60 à 70°C afin de s'assurer d'un début de dégradation rapide. Ajoutons que certains temps d'initiation de corrosion étaient très longs. Il est probable, compte tenu des informations mentionnées à la section 3.2, qu'une agitation initiale soit à proscrire (Frini et El Maaoui, 1992). Quatre mois ont été nécessaires afin d'obtenir des résultats concluants, les deux premiers ayant principalement été employés à raffiner les conditions d'expérimentation.

Tel qu'illustré à la figure 5.9 (la radiographie de l'étape intermédiaire est fournie à l'annexe 6), il est possible de remarquer qu'un échantillon est fortement attaqué lorsqu'il est exposé à un acide sulfurique 50% vol initialement chaud (60 à 70°C). La radiographie de l'échantillon attaquée montre en effet de nombreuses irrégularités au niveau du fond d'image ainsi qu'un amincissement notable de ses parois. Notons que la majeure partie des essais est effectuée à température de la pièce (20 à 25°C), car la solution n'est pas chauffée. Les pertes de parois moyennes sont évaluées à environ 0,787 mm (0,031 pouce) après seulement un cycle d'exposition (28 jours, voir tableau 5.7) et de 1,500 mm (0,059 pouce) après deux cycles (56 jours). L'attaque générée présente une grande variabilité et certaines zones montrent des pertes d'épaisseurs allant jusqu'à 2,489 mm (0,098 pouce). Ce protocole d'essais accélérés est donc très prometteur, car des pertes d'épaisseur moyennes dépassant 3,175 mm (0,125 pouce) pourraient être enregistrées après 4 à 5 cycles d'exposition (environ 112 à 140 jours d'exposition). Ces mesures ont été prises directement sur les radiographies par méthodes numériques. Il est aussi possible d'observer une corrosion importante au niveau de la soudure ainsi que la formation d'images très représentatives de cas de corrosion généralisée. En bref, les essais accélérés proposés à cette section seront employés lors d'essais à long terme visant la génération de pertes d'épaisseurs typiques à la corrosion généralisée.

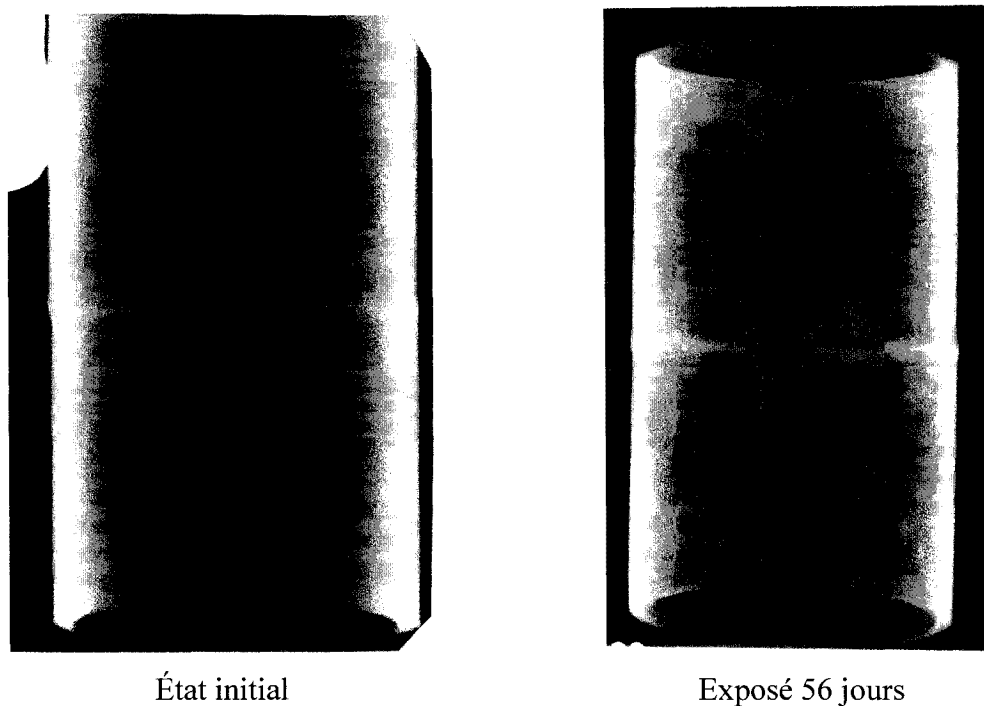


Figure 5.9 : Radiographies de tuyaux exposés à l'acide sulfurique 50%

Tableau 5.7 : Pertes d'épaisseur au niveau de la conduite exposée à H_2SO_4 50%

	Épaisseur de paroi		
	État initial	28 jours d'exposition	56 jours d'exposition
Moyenne (mm)	6.401 (0.252po)	5.613 (0.221po)	4.902 (0.193po)
Écart-type (mm)	0.178 (0.007po)	0.356 (0.014po)	0.508 (0.020po)
Maximum (mm)	6.807 (0.268po)	6.452 (0.254po)	6.045 (0.238po)
Minimum (mm)	6.096 (0.240po)	4.877 (0.192po)	3.912 (0.154po)

5.4 Protocole d'essais de corrosion final

Les sections 5.1, 5.2 et 5.3 ont fourni toutes les informations et paramètres nécessaires à l'élaboration des protocoles d'essais qui seront employés pour produire des morphologies de corrosion désirées. Cette section contient donc tous les renseignements relatifs aux essais de dégradation qui ont été réalisés pour générer les radiographies analysées dans ce rapport.

5.4.1 Méthodologie expérimentale

Dans un premier temps, la corrosion localisée par piqûres est simulée à l'aide de trous perforés dans deux demi-sections de tuyaux (tel que mentionné à la section 5.2). La corrosion localisée aux soudures ne sera pas considérée dans le cadre de ce travail vu la complexité reliée à la morphologie des zones soudées. Deux contenants d'essais seront fabriqués afin de pouvoir générer des mécanismes de corrosion généralisée (voir figure 5.10). Ceux-ci possèdent une longueur de 10 pouces; les autres caractéristiques dimensionnelles demeurant les mêmes que celles décrites à la section 5.1. Le fond employé lors de ces essais est fabriqué à partir de disques de téflon. Ces disques sont filetés à l'intérieur, tout comme la paroi externe inférieure du tuyau. Le nouveau fond est donc mis en place par vissage et un scellant à base de téflon est ajouté afin d'éviter les débordement d'acide chaud. Le montage est aussi déposé sur des tissus absorbants afin de prévenir les problèmes reliés aux écoulements d'acide. Un couvercle de téflon est ajouté sur la partie supérieure du tuyau afin d'éviter la contamination des solutions. Finalement, l'agitation se fait à l'aide de moteurs positionnés au dessus des contenants. L'épaisseur de la plaque de téflon inférieure ne permet pas l'utilisation de plaque agitatrice et chauffante telle qu'employée lors des essais précédents (voir section 5.3).

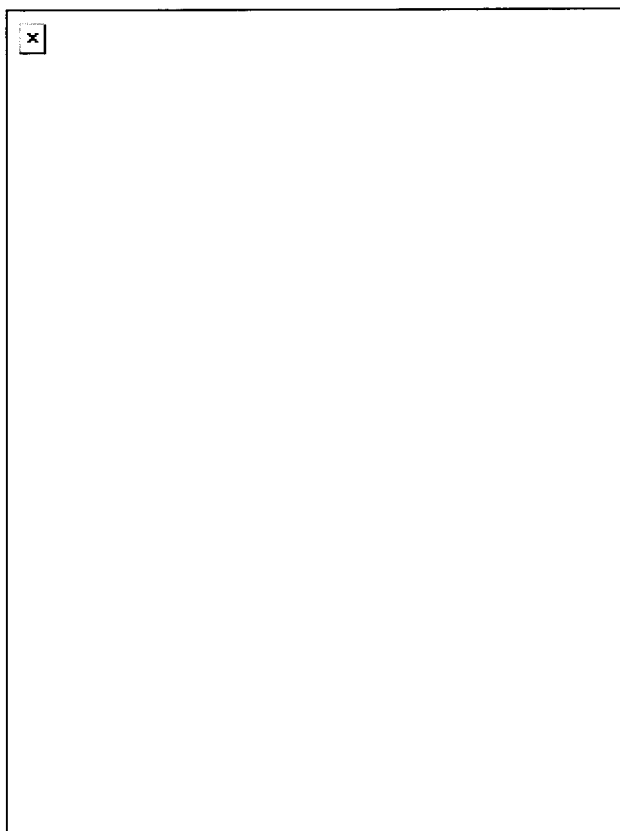


Figure 5.10 : Montages d'essais finaux

Les plaques de téflon (inférieures et supérieures) sont aussi dotées de quatre faces externes planes qui permettent le positionnement des tuyaux selon quatre angles bien précis (0° , 90° , 180° et 270°). Ces faces seront utiles afin d'aligner les tuyaux lors des séances de radiographies. Tel que mentionné à la section 5.3, les contenant sont toujours nettoyés à l'aide d'eau savonneuse et d'acétone au début de chaque cycle d'exposition. Un acide sulfurique, dont la concentration est d'environ 50% vol, est introduit dans les contenants à une température variant entre 60 et 70°C . L'agitation est ensuite démarrée et l'acide introduit est changé après 14 jours d'exposition. Le tuyau n'est pas nettoyé après ce premier délai; l'acide utilisé est simplement retiré du contenant pour être remplacé par un acide neuf ayant les mêmes caractéristiques initiales que

l'acide au départ des essais. Les résultats de ces expérimentations ont été à la base des nombreuses radiographies analysées dans ce rapport.

5.4.2 Résultats des essais

Le protocole proposé à la section précédente est très efficace et a permis d'obtenir de nombreux résultats. Toutefois son application présente certains problèmes. Premièrement, l'attaque initiale doit s'effectuer très rapidement, car le ruban de téflon utilisé ne prévient pas complètement les problèmes de fuites. Toutefois, une forte attaque (forte réaction ayant lieu quelques secondes après avoir versé l'acide dans le contenant) génère rapidement un produit solide qui agit comme joint scellant. Des débordements initiaux ont donc été observés lors des phases de démarrage des essais (tous les 28 jours). À ce propos, plusieurs problèmes ont été rencontrés lors des ces premières étapes. En effet, la réaction de dégradation initiale ne se déclenchait carrément pas et un débordement important d'acide se produisait. Trois principales causes ont été identifiées et des solutions à ce problème sont ici suggérées.

Afin d'éviter les débuts de réaction plus lents, il est primordial de bien nettoyer les tuyaux et d'en retirer les débris à la paroi et au fond. Suite à ce nettoyage, la paroi interne doit être bien sèche, car des initiations agressives de la corrosion ne semblent qu'avoir lieu à cet état. Finalement, il est très important d'éviter d'agiter la solution lorsque celle-ci est versée à l'intérieur des contenants. En effet, la composition chimique des solutions montre que les mécanismes de dégradation des aciers inoxydables (aciers de type 304 à l'état actif) peuvent obéir aux lois identifiées par Frini et El Maaoui (1992). Ces derniers observent une hausse importante de la vitesse de dégradation suite à un maximum de concentration en chrome dans la solution. Sans agitation, ces chercheurs observent ce pic (voir figure 5.11) après environ une heure et demi pour un acide de faible concentration (10% vol) à 80°C. Ce pic semble toutefois apparaître en un peu moins d'une heure pour des acides de plus fortes concentrations (20% et 30% vol) à

la même température. Le chrome semble donc jouer un rôle important dans les mécanismes de dégradation des aciers inoxydables de la série 300 exposés à de l'acide sulfurique.

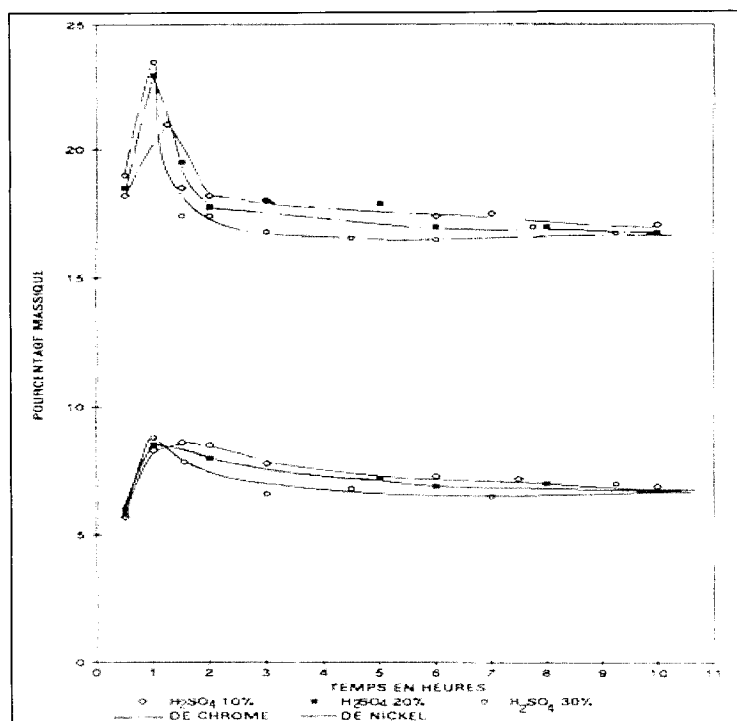


Figure 5.11 : Pic de chrome observé avant le début de l'attaque rapide de l'acier

Les compositions des solutions qui généraient peu d'attaque ont donc été analysées après deux semaines dans les tuyaux. Le tableau 5.8 montre une concentration plus élevée en chrome dans les solutions par rapport à l'alliage. Il est donc possible que le pic de chrome n'ait jamais été atteint, car ce dernier est suivi d'une attaque rapide et d'une uniformisation de la composition de la solution par rapport à celle de l'alliage. Notons que les solutions produisant de tels résultats ont été agitées lorsqu'elles ont été versées. Une concentration critique en chrome ne s'est probablement pas générée près des surfaces. En bref, il est préférable de laisser la solution stagnante jusqu'à l'apparition d'une forte réaction entre l'acide et le matériau. Une fois celle-ci démarrée, une agitation

ne semble pas diminuer son intensité. Si les conditions mentionnées à ce paragraphe sont bien respectées, il est fort peu probable de rencontrer des problèmes lors de l'exécution des protocoles d'essais accélérés.

Tableau 5.8 : Composition en chrome dans l'alliage et dans la solution acide

Échantillon	$X_{Cr}/(X_{Cr} + X_{Fe})$ Après deux semaines d'exposition (dans l'alliage)	$X_{Cr}/(X_{Cr} + X_{Fe})$ Après deux semaines d'exposition (dans l'acide)
Tuyau#1	0,186	0,228
Tuyau#2	0,186	0,218

6 ÉTUDE DE RADIOGRAPHIES DE CONDUITES

Tel que mentionné précédemment, le calcul de l'indice de sévérité de la corrosion nécessite la connaissance des mécanismes de dégradation en cours dans les conduites. Heureusement, cette information est présente au niveau des fonds d'images de radiographies. Toutefois, des techniques d'analyses de fonds doivent être développées pour permettre un bon classement des mécanismes, peu importe les conditions de radiographies. La mesure d'épaisseurs à partir de fonds d'images est aussi une capacité intéressante à développer. Cette section a pour but l'identification de techniques potentielles pouvant donner naissance à de puissants modèles de classification de radiographies.

Pour ce faire, deux étapes ont été réalisées. Premièrement, des modèles polynomiaux de degré 4 ont été appliqués à des radiographies corrodées (corrosion généralisée) et non corrodées afin d'identifier des modèles intéressants à étudier et certaines caractéristiques à mesurer (section 6.1). Par la suite, trois modélisations de fonds d'images ont été effectuées et analysées afin de mieux comprendre le processus de radiographie de conduites et le comportement de films radiographiés (section 6.2). Ces modélisations ont aussi permis d'identifier certaines sources d'imprécisions reliées à la configuration des pièces et au processus d'exposition des films.

6.1 Étude de fonds d'images de conduites corrodées

Les essais réalisés aux sections 5.3 et 5.4 ont générés de nombreuses conduites corrodées qui ont été radiographiées en laboratoire. Les radiographies obtenues ont pu être étudiées afin d'identifier des caractéristiques intéressantes pour la caractérisation de la dégradation à partir des fonds d'images. Plusieurs modèles ont été appliqués au

niveau des fonds d'images radiographiques tels que des modèles exponentiels, logarithmiques et des équations polynomiales de degrés 2, 3 et 4. Ces essais ne sont pas tous présentés à cette section afin de ne pas alourdir inutilement ce travail. Il n'y a que les modèles les plus prometteurs qui y sont traités soit les équations polynomiales de degré 4. Cette section se concentre donc sur l'analyse de fonds d'images radiographiques réalisée à partir de tels modèles et deux essais y sont présentés. Le premier traite d'une analyse réalisée sur un tuyau non corrodé. Son but est d'étudier le comportement d'un modèle polynomial de degré 4 appliqué à un fond d'image sain. Comme le premier essai s'est avéré prometteur, un second test est effectué afin de vérifier si les résidus du modèle pouvaient être employés afin de caractériser la corrosion. Ces deux essais sont traités en détails dans les sections qui suivent.

6.1.1 Méthodologie expérimentale

Afin de réaliser le premier essai, une section du tuyau d'acier inoxydable non corrodée, déjà employée lors des essais décrit à la section 5, a été radiographiée à l'aide d'un film de marque Fuji 50 et d'une source d'iridium 192. La source était située à 635 mm du film (25 pouces) et centrée sur le tuyau. Le film a ensuite été digitalisé par un scanner de marque Lumisys et modifié à l'aide du logiciel *Adobe Photoshop*. Notons que la digitalisation implique un changement au niveau des données à analyser. En effet, lors de cette opération, les données de densité radiographique sont transformées en niveau de gris. La fonction employée, qui transforme les densités radiographiques (varie typiquement de 1 à 4) en niveaux de gris (échelle de 0 à 255), dépend de l'étalonnage du digitaliseur.

Les premières opérations de traitements d'images consistaient à positionner les parois de manière parfaitement horizontale (tel que présenté à l'annexe 1) et à transformer une image de type couleur à une image en niveaux de gris. Notons que toutes ces transformations sont effectuées à partir de fichiers *bitmap* afin de préserver

une qualité d'image optimale. Les images sont finalement transformées en *JPEG* de haute qualité afin d'être analysées à l'aide du logiciel *Image tool 3.0*. Suite au travail de transformation des images, une ligne d'une largeur de 1 pixel est mesurée d'une paroi à une autre au niveau du fond de l'image (à l'aide du logiciel *Image tool 3.0*). Les côtés internes des parois sont repérés à l'aide des maximums d'intensités (qui représentent les épaisseurs maximales traversées). Cette technique a été employée lors de travaux précédents (Naud, Chalifour, Dubé et Brochu, 2004) et sera clarifiée à la section 6.2.1. Suite à l'identification de ces maximums, 10 pixels sont retranchés à partir des délimitations internes des parois en allant vers le centre (pour les deux parois). La zone extérieure et les parois sont donc complètement éliminées afin de ne modéliser que le fond de l'image. L'échelle est aussi fixée afin que son centre ($X = 0$) soit situé au milieu des tuyaux radiographiés. Notons que ces opérations de transformations sont effectuées directement sur des données Excel provenant des radiographies digitalisées. Chaque pixel est analysé, aucune autre donnée n'est éliminée. Ces pixels représentent l'intensité de chaque point en niveaux de gris. Les zones les plus foncées tendent donc vers 0 (noir « parfait ») alors que les zones les plus claires sont plus près de 255 (blanc « parfait »).

Les mêmes opérations de traitements et d'analyse d'images ont été effectuées sur trois images provenant de deux conduites radiographiées. La première section de tuyau a été radiographiée selon deux angles différents et ne présente pas de corrosion. La troisième montre quant à elle la présence d'un début de corrosion généralisée qui est plus prononcée dans sa partie inférieure. Les méthodes de radiographies sont les mêmes que celles présentées au paragraphe précédent.

Les résultats de la première expérience présentés à la section 6.1.2 montrent la présence des tendances générées par l'utilisation des modèles polynomiaux de degré 4. Cependant, ce ne sont pas les modèles eux-mêmes qui seront employés à la caractérisation des images, mais leurs résidus. La deuxième série d'expérimentations vise donc à comparer les sommes de carrés moyennes des résidus provenant de

conduites corrodées et non corrodées afin d'évaluer si ceux-ci pourraient être employés à la caractérisation de fonds d'images. Pour ce faire, 10 lignes sont analysées par tuyau (voir Annexe 7) à l'aide de la procédure précédemment mentionnée. Une somme de carrés moyenne des résidus (appelée MSE) est calculée pour chacune d'entre elle. Les résultats de toutes ces expérimentations sont présentés à la section 6.1.2.

6.1.2 Résultats des essais

L'application d'un modèle polynomial de degré 4 à des données de fonds provenant d'une première radiographie non corrodée a permis la génération de la figure 6.1 (les points en bleu correspondent aux données et la courbe en rouge à la modélisation de degré 4). On retrouve en abscisse la position en pixels et en ordonnée l'intensité des pixels (variant de 0 à 255). À première vue, les données montrent une croissance plus rapide aux bords et aucune oscillation n'est observée au niveau du modèle. Il est aussi à noter que la courbe est presque parfaitement symétrique selon $X = 0$. Ceci est dû au fait que le montage de radiographie implique une source centrée sur le tuyau et le film. Il en aurait probablement été autrement avec un arrangement non centré selon l'axe X. Ce dernier aurait généré un noircissement plus important sur un des deux côtés. Le fait d'éliminer les pixels à proximité des parois semble aussi favoriser une modélisation adéquate des données par le polynôme.

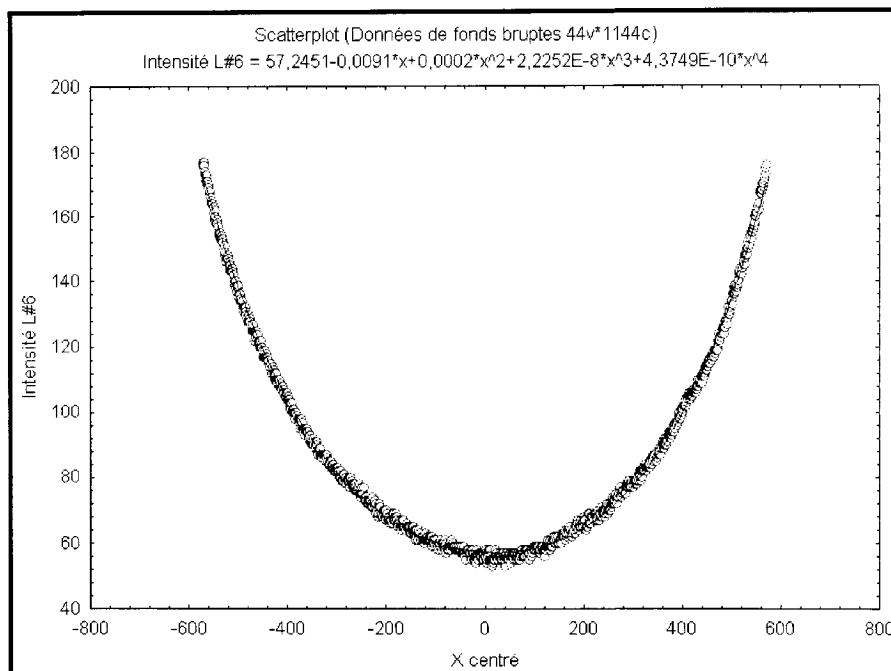


Figure 6.1 : Modélisation de fonds d'images radiographiées et digitalisée

Il faut aussi noter que les modèles de type polynomiaux représentent très bien la variabilité retrouvée au niveau des données de fonds d'images. En effet, le tableau 6.1 montre que les sommes de carrés moyennes (« Regress » = 168903,3 dans le tableau 6.1) associées au modèle sont très supérieures à celle de l'erreur (« Residual » = 529,3 dans le tableau 6.1). De plus, le R^2 et le R^2 ajusté, (0.99794 et 0.99793 respectivement) sont très élevés. Cette information implique qu'une grande partie de la variabilité des données (plus de 99%) est expliquée par le modèle. Le R^2 ajusté est ici utilisé afin de considérer l'effet du nombre de variables employées dans un modèle. En effet, le coefficient R^2 augmente en fonction des variables explicatrices ajoutés, mais le R^2 ajusté tient compte de cet effet. Pour cette raison, le R^2 ajusté est toujours égal ou inférieur au R^2 . La tendance de type « polynomiale », qui représente la chute des intensités des bords au centre de l'image, est donc prédominante sur les variations locales de niveaux de gris

dans le cas d'un tuyau neuf. Ce fait sera utilisé avantageusement à la caractérisation de la corrosion au niveau de conduites droites.

Tableau 6.1 : Analyse de variance relié au modèle de fond d'image

Effect	Analysis of Variance				
	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	168903,3	4	42225,82	21780,50	0,00
Residual	529,3	273	1,94		
Total	169432,6				

Il est cependant important de compléter l'analyse statistique reliée au modèle polynomial employé. En premier lieu, il est possible de remarquer une forte tendance au niveau des résidus normalisés (voir figure 6.2). Ceux-ci devraient normalement être distribués de manière « rectangulaire » c'est-à-dire, entre deux lignes situées à environ 2.5 et -2.5 sur la figure 6.2. Les résidus analysés ici montrent que le modèle parvient mal à reproduire les zones adjacentes aux parois ainsi que le centre de la radiographie. Ajoutons aussi qu'un léger problème de multicolinéarité est présent (VIF moyen de 9.25) et qu'il est possible de noter un certain éloignement à la normalité (voir figure 6.3).

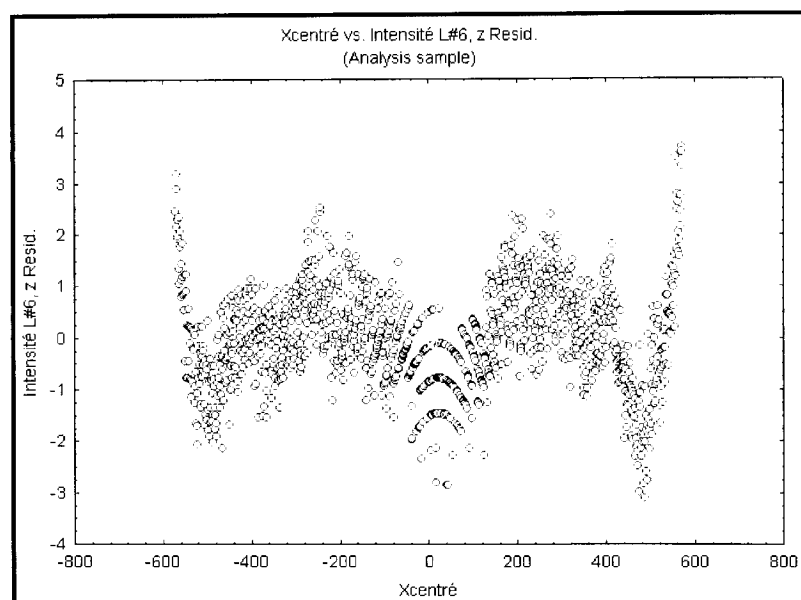


Figure 6.2 : Résidus normalisés de modèles de fonds d'images corrodées

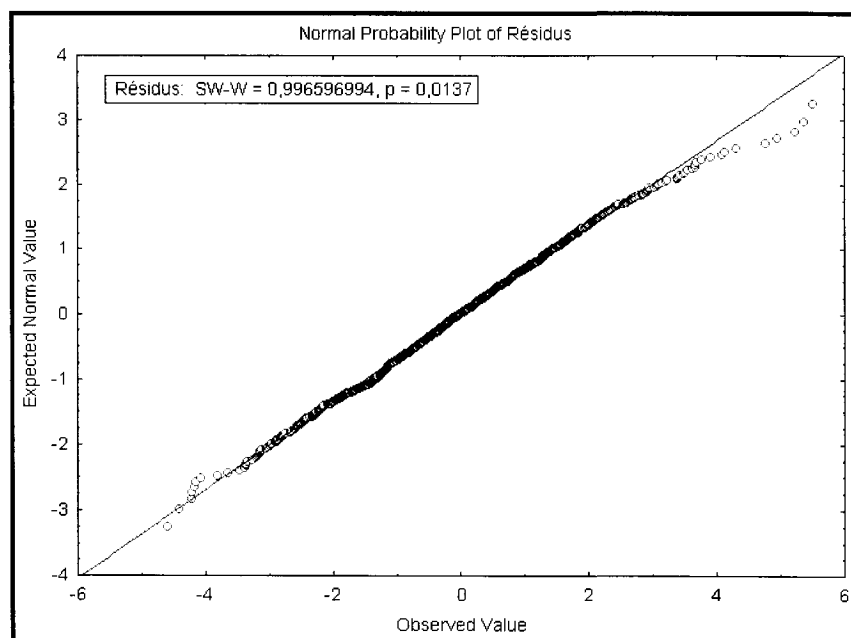


Figure 6.3 : Analyse de normalité du modèle de fonds de radiographies

Malgré la présence des tendances observées, l'utilisation des modèles polynomiaux est toujours considérée. En effet, ce ne sont pas les modèles eux-mêmes qui seront employés à la caractérisation des images, mais leurs résidus. De par leur définition, ceux-ci représentent l'état d'un fond de conduite sans l'influence de la chute des tons de gris du bord au centre de l'image. Le fait que certaines zones soient mal reproduites par les modèles ne pose pas de problème. En effet, on peut supposer que la configuration des résidus risque fort bien de demeurer la même, peu importe les caractéristiques et l'état des conduites à analyser. En effet, toute conduite radiographiée va présenter un degré de noircissement important au centre ainsi que des parois claires. Ces caractéristiques similaires risquent de donner lieux à des écarts semblables au niveau des résidus soit des tendances près des parois et au centre, tel qu'observé à la figure 6.3. Ce point sera toutefois traité plus en détails à la section 6.2.3. Les résidus et leurs sommes de carrés moyennes (MSE) pourraient donc représenter fidèlement l'état d'une conduite donnée.

Trois hypothèses sont ici considérées. En premier lieu, on suppose les résidus indépendants de toutes variables à l'exception près de la corrosion. On pose aussi que les résidus représentent fidèlement les données de fonds d'images malgré les variations potentielles des modèles dont ils découlent. Finalement, on considère que les erreurs globales des modélisations, engendrées par l'utilisation d'équations polynomiales d'ordre 4, sont constantes peu importe l'état des conduites et les paramètres employés pour les radiographier. Les expérimentations réalisées à la section 7 auront pour but la vérification de ces trois hypothèses.

La seconde série d'essais présentée à la section 6.1.1 est donc réalisée afin de vérifier si les résidus peuvent être employés pour caractériser la corrosion. Les résultats des dix modélisations des trois tuyaux sont présentés au tableau 6.2. Ces derniers montrent une très faible variance dans le cas du tuyau non corrodé (radiographies T1-F50-0°-A#1-I#1 et T1-F50-90°-A#1-I#1) ainsi qu'une moyenne autour de 2.00.

Ajoutons que tous les résultats provenant de cette conduite semblent être près de cette valeur. En ce qui a trait au tuyau corrodé (radiographie T2-F50-0°-A#1-I#2), il est possible de repérer la présence de nombreux points s'écartant de 2.00. La zone du bas montre des résidus particulièrement élevés (lignes#7 à #10). Ces indices sont appuyés par la présence de corrosion plus importante dans cette région de la conduite (voir figure 6.4 et annexe 7). Notons que les MSE provenant des zones supérieures de cette radiographie (lignes #1 à #6) se rapprochent parfois de 2.00, car elles présentent beaucoup moins de corrosion.

Tableau 6.2 : Analyses de fonds d'images basées sur des sommes de carrés de résidus

Tuyau T1-F50-0°-A#1-I#1			Tuyau T1-F50-90°-A#1-I#1			Tuyau T2-F50-0°-A#1-I#2		
#Ligne	MSE	Degré du polynôme	#Ligne	MSE	Degré du polynôme	#Ligne	MSE	Degré du polynôme
1	2,33	4	1	1,90	4	1	2,00	4
2	2,08	4	2	2,20	4	2	3,17	4
3	2,11	4	3	2,30	4	3	3,70	4
4	2,19	4	4	2,60	4	4	2,83	4
5	2,22	4	5	2,60	4	5	3,32	4
6	2,20	4	6	2,60	4	6	2,84	4
7	2,16	4	7	2,30	4	7	3,80	4
8	2,04	4	8	2,40	4	8	3,90	4
9	1,95	4	9	2,20	4	9	5,90	4
10	1,67	4	10	1,90	4	10	5,80	4
Moy	2,10		Moy	2,30		Moy	3,73	
Var	0,03		Var	0,07		Var	1,57	

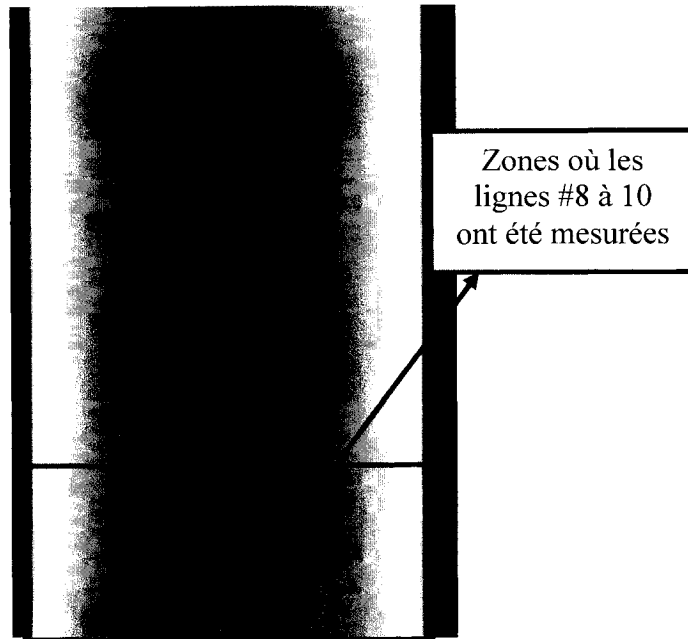


Figure 6.4 : Échantillon T2-F50-0°-A#1-I#2

Ces analyses montrent qu'il est fort probable que les fonds d'images radiographiques puissent être analysées à l'aide des résidus et des MSE. Les résidus de modèles polynomiaux, appliqués à des fonds d'images, contiennent donc de l'information qui provient des mécanismes de corrosion. Ils pourraient être exploités dans des algorithmes de reconnaissance de la corrosion qui constituent le cœur du processus de détermination de l'indice de sévérité de la corrosion. De nouveaux essais plus poussés sont cependant nécessaires afin de vérifier les trois hypothèses mentionnées précédemment. De plus, l'origine de la tendance présente au niveau des résidus (zones du centre et des côtés mal modélisées) doit être identifiée, ce qui est effectué à la section suivante. La radiographie industrielle implique aussi une importante quantité de variables qui n'ont pas été prises en compte lors de ces premiers essais. Par exemple, la réalisation de radiographies en laboratoire a permis un centrage parfait de la source sur le tuyau et le film ainsi que l'utilisation d'une puissance d'irradiation constante. Or, il est plutôt rare de retrouver de telles conditions en chantier. D'autres essais s'imposent

donc afin d'évaluer l'influence des ces variables sur les MSE. Ceux-ci sont réalisés à la section 7 de ce rapport.

6.2 Étude de modèles théoriques de conduites radiographiées

La section précédente montre bien le potentiel des résidus de modélisation polynomiales d'ordre 4 à représenter des fonds d'images radiographiques. Cependant, ces analyses ne permettent pas de dégager la provenance de tendances particulières observées au niveau du profil des résidus (voir figure 6.2). Des modélisations de cas idéaux pourraient sans aucun doute fournir de plus amples renseignements quant à ces irrégularités. Trois simulations bidimensionnelles sont donc générées et analysées. Les deux premières visent la modélisation des épaisseurs traversées par le rayonnement dans la pièce en fonction de la position de réception sur le film. Elles contribuent à mieux comprendre la formation des images de conduites radiographiées. Le premier modèle concerne les épaisseurs traversées dans une coupe radiale (section 6.2.1) alors que le deuxième concerne une coupe longitudinale (section 6.2.2). Le troisième modèle vise, par la transformation des épaisseurs traversées, la représentation de la densité radiographique en fonction de la position sur un film (section 6.2.3). Ce modèle est analysé à l'aide d'une régression statistique afin d'observer le profil de résidus produit. Pour des fins de concision et de clarté, les méthodologies employées sont présentées dans les mêmes sections que les résultats (sections 6.2.1, 6.2.2 et 6.2.3).

6.2.1 Modélisations des épaisseurs traversées, coupe radiale

Le phénomène d'exposition d'un tuyau à une source de rayonnement gamma ainsi que l'enregistrement des informations apportées par le rayonnement sur un film peuvent être étudiés à l'aide d'un modèle bidimensionnel simple. En effet, il suffit de positionner deux cercles concentriques à l'origine et de fixer un point représentant la

source à une hauteur H au-dessus du cercle extérieur (voir figure 6.5). Le plan de réception des rayons, le film, a donc pour coordonnées $y = -R$ et la source se situe à $X = 0$ et $Y = R + H$. Une fois les diverses coordonnées attribuées, il devient possible de faire passer plusieurs droites de la source jusqu'au film. Les divers points d'intersections entre les droites et les cercles peuvent être calculés par des résolutions mathématiques simples à partir de systèmes de deux équations ayant deux inconnus. Une fois les coordonnées identifiées, il devient aisé de calculer les diverses distances, D_1 , D_2 et D_T , en fonction des droites projetées. Il est aussi possible d'identifier la position d'intersection de ces droites avec le plan représentant le film. Il s'agit d'utiliser les équations des droites (de type $y = mx + b$, voir équations 6.1 et 6.2) avec les coordonnées du film. Notons que cette modélisation concerne uniquement la section directement située sous la source. Les autres zones doivent être modélisés à l'aide d'ellipses (modèles à trois dimensions). Cependant, pour les hauteurs employées, il est possible de considérer l'effet longitudinal sur la forme des courbes comme presque négligeable. Cette affirmation sera expliquée plus en détails au cours de cette section.

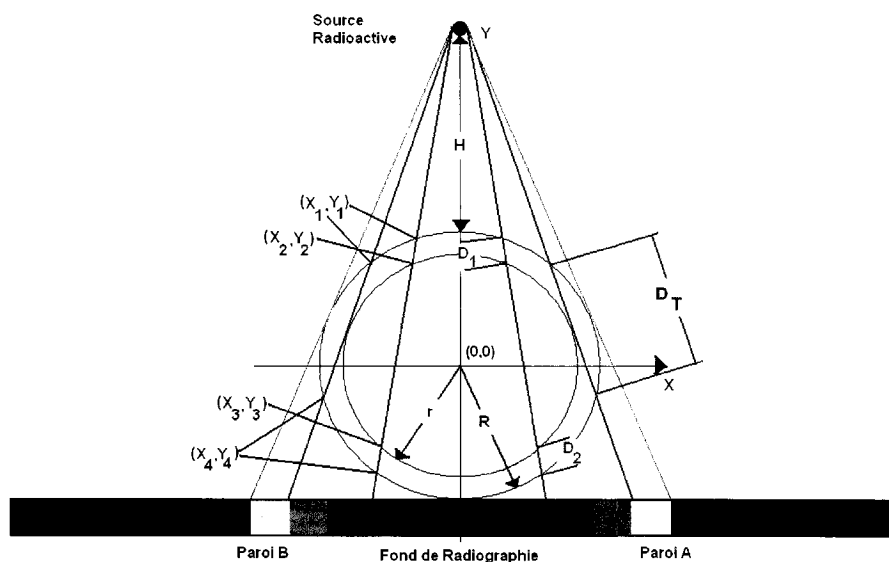


Figure 6.5 : Système de modélisation bidimensionnelle de radiographie de conduites

$$\text{Équation 6.1 : } D_T = \sqrt{\left((X_4 - X_1)^2 + (Y_4 - Y_1)^2\right)}$$

$$\text{Équation 6.2 : } D_1 = D_2 = \sqrt{\left((X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2\right)} = \sqrt{\left((X_4 - X_3)^2 + (Y_4 - Y_3)^2\right)}$$

L'application d'une telle méthode permet donc d'obtenir les diverses distances traversées par le rayonnement dans la pièce. La figure 6.6 illustre bien l'évolution de l'épaisseur traversée en fonction de la position sur le film. Notons que le profil est parfaitement symétriques de part et d'autre de l'axe y et que la fonction possède deux maximums retrouvés aux points de tangence entre le cercle interne et deux droites partant de H (droites en bleu, voir figure 6.5). Cette modélisation explique donc le critère d'élimination des parois employé à la section 6.1. Ce maximum est utilisé afin de mesurer l'épaisseur de parois à partir de radiographies. L'autre délimitation à considérer consiste au changement de pente observé entre 2,5 et 3 pouces à la figure 6.6 et 6.7 (ainsi qu'entre -2,5 et -3 pouces). Notons que l'épaisseur traversée progresse de manière plutôt lente entre -1,5 et 1,5 pouces. À l'extérieur de ces limites, la fonction possèdent une progression très rapide jusqu'aux deux points maximums.

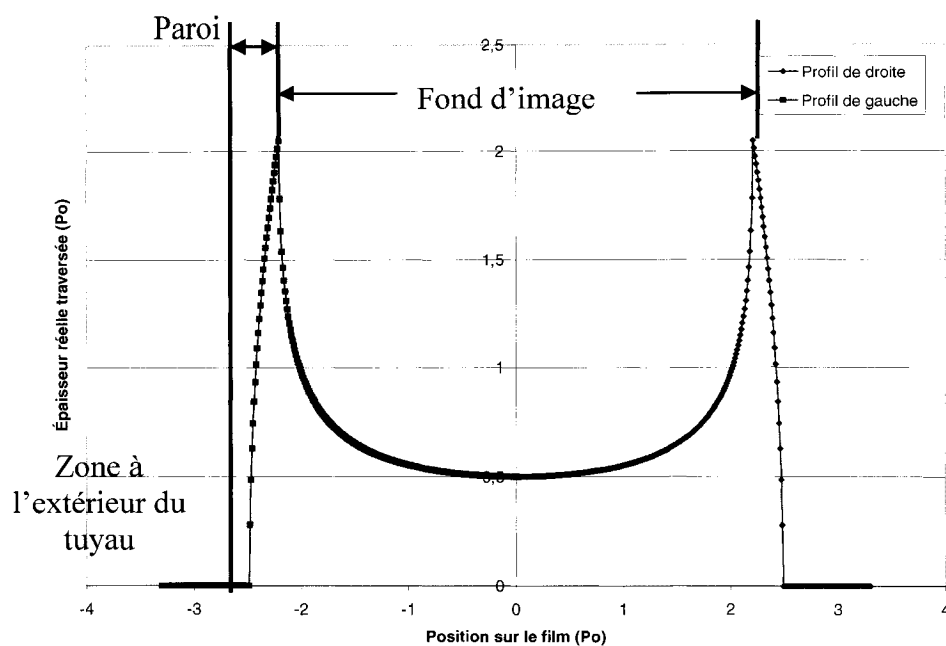


Figure 6.6 : Épaisseurs traversées dans la pièce en fonction de la position sur le film

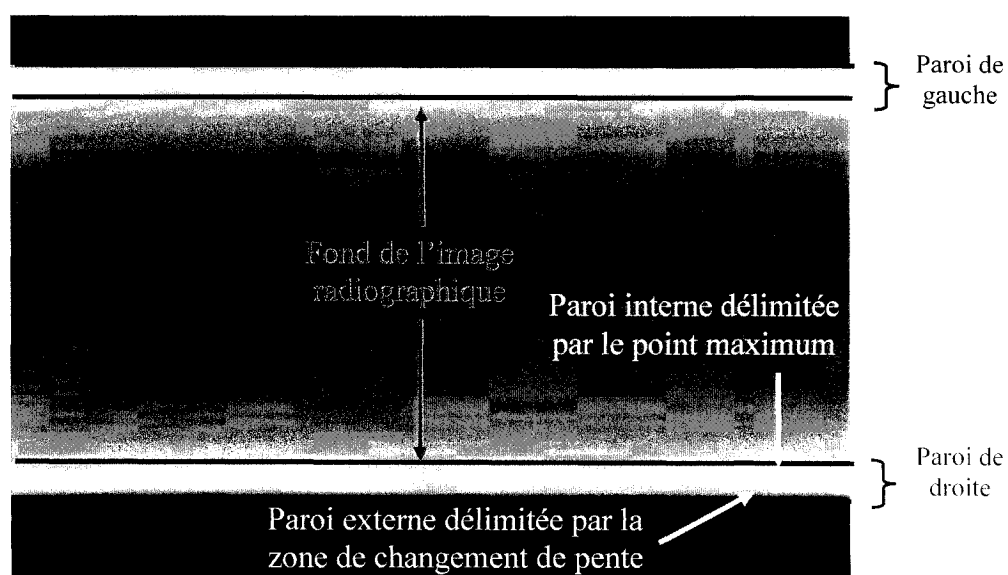


Figure 6.7 : Délimitation des parois d'un tuyau radiographié

Cette courbe ne représente toutefois pas exactement le comportement observé sur un film. En effet, tel que mentionné à la section 2.3, les lois d'absorption des radiations ne sont pas linéaires et il en va de même pour le noircissement du film. Des études de modélisations par régressions seront donc réalisées à partir de données de densités radiographiques (voir section 2.3.2).

La modélisation des épaisseurs traversées présentée précédemment permet toutefois l'illustration d'un inconvénient majeur reliée à la radiographie de conduites. En effet, comme l'épaisseur traversée varie en fonction de la position, la résolution d'une radiographie devient dépendante de la position sur le film. Plus précisément, plus l'épaisseur traversée est grande et plus la résolution est faible. Cette variation se traduit par l'effet suivant : pour produire un même noircissement, un défaut doit être plus profond aux bords qu'au centre d'un tuyau radiographié. La figure 6.8 illustre bien ce phénomène où la position est représentée sous forme de pourcentage cumulatif de l'image couverte (du centre aux limites extérieures des parois). Cette figure a été réalisée en considérant une résolution de 2% au centre et une paroi de 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ de pouce) d'épaisseur. Dans le cas d'une conduite, deux parois sont traversées par le rayonnement au niveau des fonds d'images. Un défaut doit donc avoir une profondeur de 0,254 mm (0,01 pouce), ou 4% de l'épaisseur totale traversée (au centre d'un tuyau) pour être bien visible (résolution de 2% par paroi ce qui fait 4% pour les deux parois de 0,25 pouce à traverser). Pour produire un même effet de noircissement, ce même défaut doit représenter environ 16% de l'épaisseur en bordure de parois. Vu son importance, il est primordial de tenir compte de ce phénomène dans le cadre des analyses de fonds d'images. Il est aussi fort probable que la résolution au centre soit supérieure à 2% (par paroi), ce qui entraîne une perte beaucoup plus prononcée lorsque l'on s'éloigne du centre de la conduite.

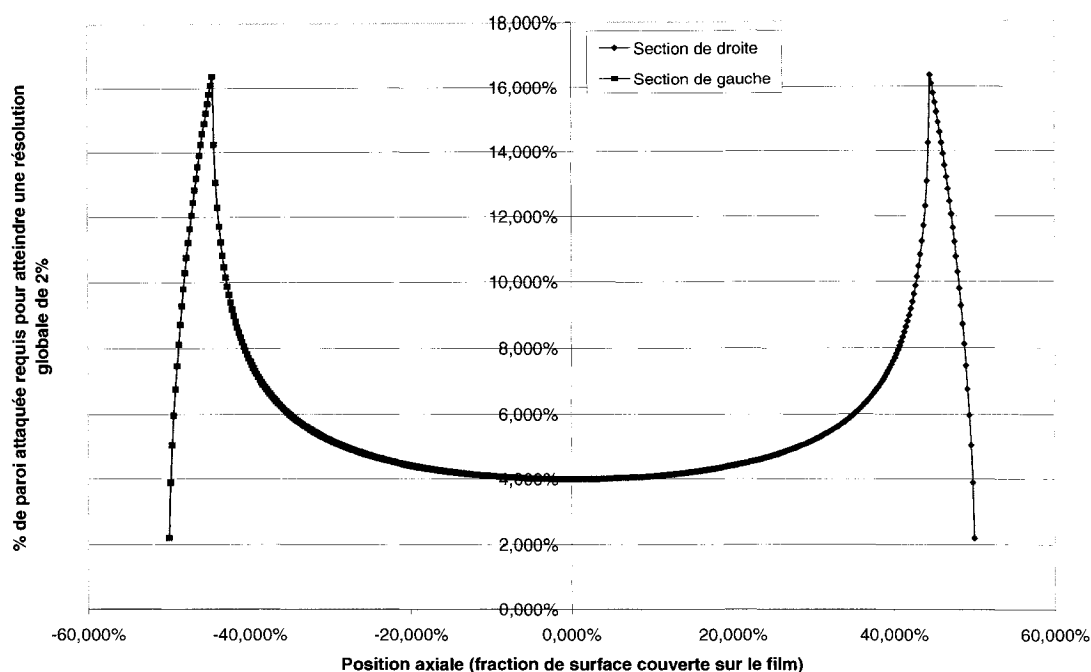


Figure 6.8 : Variation de la résolution en fonction de la position dans le tuyau

6.2.2 Modélisations des épaisseurs traversées, coupe longitudinale

Il est aussi important de vérifier que le type de courbe présenté à la section précédente peut bien s'adapter à toute une radiographie. En effet une telle analyse permet d'éviter de générer des modélisations tridimensionnelles complexes afin de représenter un phénomène peu important. Une autre modélisation bidimensionnelle peut donc être effectuée afin d'évaluer la variation d'épaisseurs traversées dans le sens longitudinal. Cette dernière est relativement simple : il s'agit de quatre droites centrées à l'origine employées afin de délimiter des parois. Ce type de modélisation représente donc un plan de coupe d'une conduite généré par les axes Y et Z (voir figure 6.9). Celui-ci passe par le centre de la conduite et contient la source. La quatrième droite

($Y = -R$) représente aussi le film, car ce dernier est normalement en contact avec la zone centrale du tuyau. Notons finalement que l'épaisseur traversée se calcule de la même manière que dans la coupe radiale précédemment traitée.

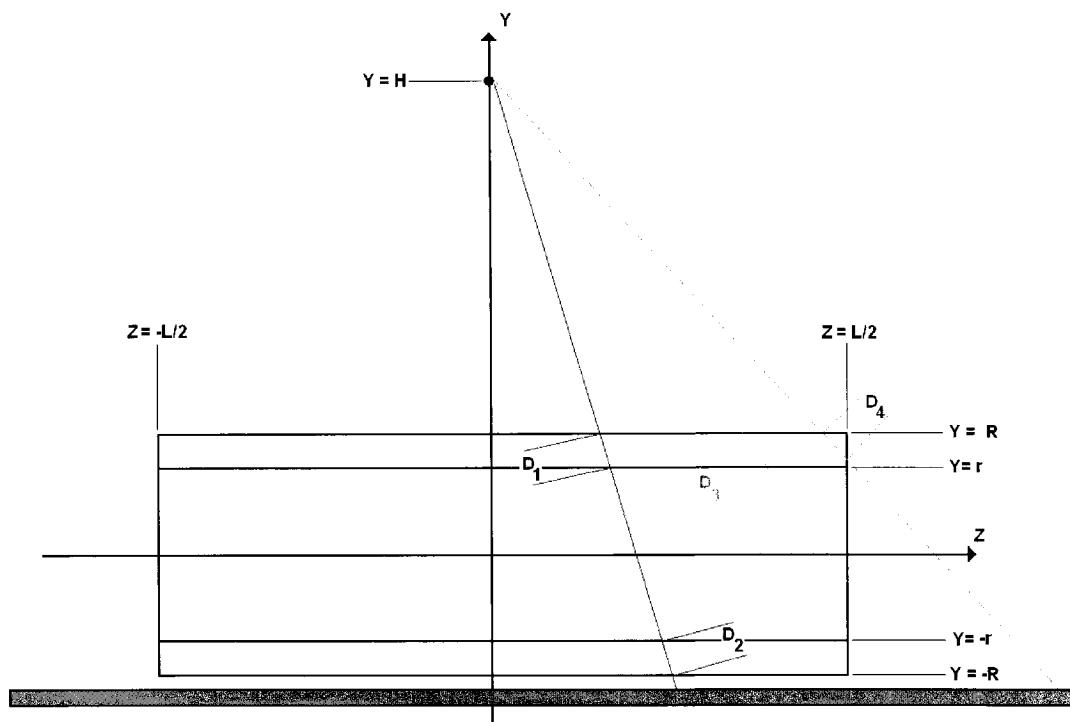


Figure 6.9 : Modélisation des épaisseurs traversées dans le sens longitudinal

La réalisation de la modélisation révèle, pour une source située à 635 mm du film (25 pouces) et un tuyau d'une longueur de 254 mm (10 pouces), que l'épaisseur varie peu selon l'axe Z . En effet, il est possible d'observer à la figure 6.10 une épaisseur maximale traversée ne dépassant pas 12,9515 mm (0,5099 pouce) ainsi qu'une progression très lente en fonction de Z . Une première chute rapide des épaisseurs est aussi observée suite aux premiers points maximums. Celle-ci est expliquée par le fait qu'à un endroit donné, le rayonnement ne traverse qu'une seule paroi (voir figure 6.9, droite en vert). Par la suite, ce pallier chute à nouveau car la distance parcourue dans la dernière paroi devient de plus en plus petite (voir figure 6.9, droite en bleu). Ajoutons

toutefois que l'identification de ce pallier est pertinente en laboratoire, mais ne l'est pas au niveau industriel. En effet, aucune discontinuité ne devrait être observée sur une conduite droite en service. Pour une longueur continue de 254 mm (10 pouces), une profondeur traversée maximale de 13,0734 mm (0,5147 pouce, cas industriel) devrait être observée. Une augmentation de 3% est donc observée entre $Z = 0$ et $Z = L/2$ au niveau du plan Y-Z. La variation d'épaisseurs traversée dans le sens longitudinal est donc faible; elle est même de l'ordre de la résolution d'une radiographie. Il est donc fort probable que la position longitudinale ait peu d'influence sur les mesures effectuées dans les fonds d'images. Afin de vérifier s'il en est de même pour toutes les positions radiales, il est possible d'utiliser une combinaison des modèles radial et longitudinal. En premier lieu, l'épaisseur maximale radiale est identifiée à l'aide des calculs que l'on peut déduire de la figure 6.5. Dans le cas d'un tuyau ayant une paroi de 0,635 mm ($\frac{1}{4}$ de pouce) d'épaisseur, ce maximum se situe juste avant le point de tangence et est d'environ 4,572 mm (1,80 pouce). En étudiant l'effet d'une telle épaisseur à l'aide du modèle longitudinal, on obtient une variation maximale approximée d'environ 2,2% entre l'épaisseur $Z = 0$ et $Z = L/2$. L'erreur entre une mesure prise au niveau de la coupe radiale centrale d'un tuyau et tout autre position longitudinale est donc faible et reste toujours très près de la résolution maximale que peu atteindre une radiographie.

En bref, le paragraphe précédent montre bien qu'il est possible d'utiliser une modélisation radiale centrée afin d'évaluer le comportement global de toutes les radiographies de ce travail. Des modélisations tridimensionnelles plus fines pourraient toutefois être développées dans le cadre de travaux futurs. Il est aussi important d'employer, lors des procédures de radiographies, une méthode permettant la caractérisation de la résolution (IQI) telle que spécifiée par les normes ASTM (2004a, 2004b, 2004c, 2004d) et ISO (2004a, 2004b, 2004c, 2004d).

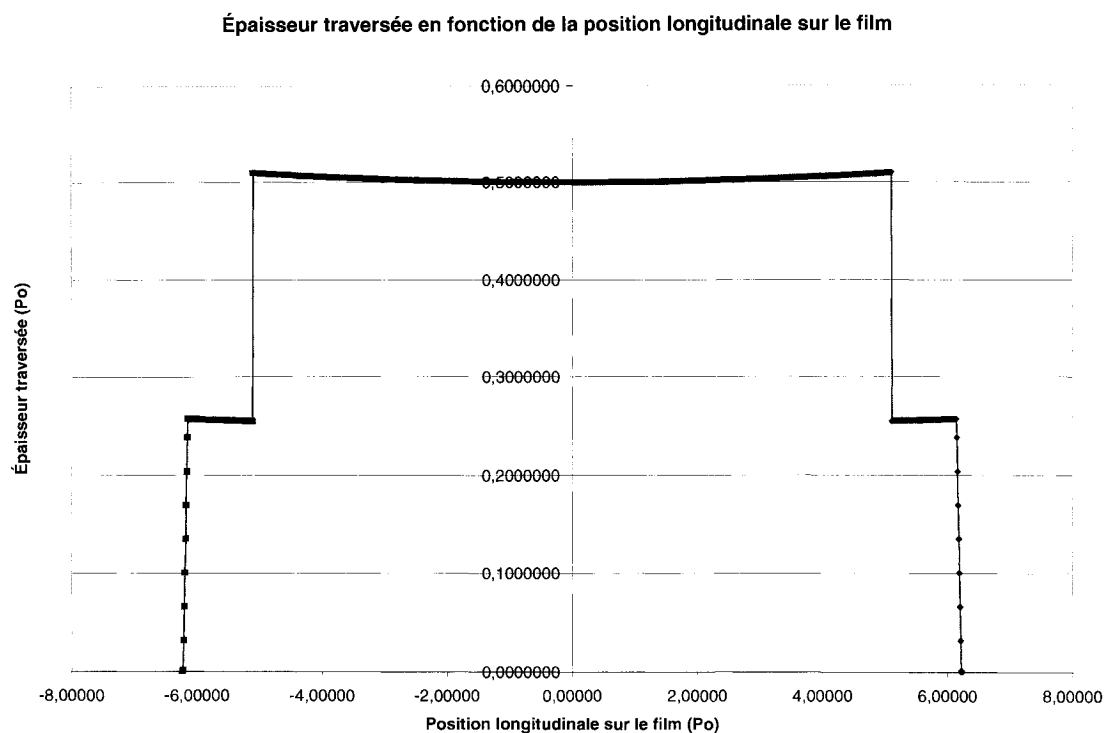


Figure 6.10 : Épaisseurs traversées dans le sens longitudinal du tuyau

6.2.3 Modèles de régression de fonds d'images radiographiques

La section précédente a montré les résultats d'un modèle de régression appliqué sur des épaisseurs traversées par un rayonnement gamma. On va maintenant utiliser ces données d'épaisseurs traversées afin d'en obtenir une puissance de rayonnement exposant un film donné. Par la connaissance de la courbe d'exposition du film, il sera possible de transformer les débits de dose (en Kerma) en densités radiographiques pour ainsi obtenir le comportement réel d'un film donné. Selon Ruault (1991), les densités des régions « linéaires » des films peuvent être modélisées par l'équation 6.3. Il est aussi possible d'utiliser l'équation 6.4 afin de déterminer le débit de Kerma à 1 mètre de la source. Une fois le débit de Kerma « source » évalué, il devient possible d'utiliser les

épaisseurs traversées ainsi que les équations de la section 2.3 pour obtenir les densités désirées. Les paragraphes qui suivent fournissent plus de détails quant aux calculs de densités radiographiques.

Équation 6.3 : $D = ke^{2,3 \ln \dot{X}t}$

Où D est la densité radiographique du film, k est une constante caractéristique de la pente de la zone linéaire (dépend du type de film), \dot{X} est le débit de Kerma en coulombs par $\text{kg}^{-1} \text{ heure}^{-1}$ et t est le temps d'exposition en heure.

Équation 6.4 : $\dot{X} = \frac{3,76 \times 10^{-6} (AWp)}{d^2}$

Où A est l'activité de la source en GBq, W est l'énergie des photons présents dans le spectre et p est l'abondance de ceux-ci, d est la distance entre la source et le détecteur (fixée à 1m).

En premier lieu, il faut déterminer le débit de Kerma « source » grâce à la connaissance des caractéristiques de la source d'iridium 192 utilisée. Celles-ci sont affichées au tableau 6.3. On suppose aussi cette dernière est ponctuelle. Comme trois raies d'énergies différentes sont émises par la source, il faut calculer trois débits de Kerma distincts. En effet, l'absorption de la radiation de plus haute énergie par le matériau est moindre que celle associée au rayonnement de plus faible énergie. Les trois débits de Kerma pour les raies de 0,310 MeV, 0,470 MeV et 0,610 MeV sont respectivement de 0,0073831, 0,0026878 et de 0,00082637 $\text{C kg}^{-1} \text{ heure}^{-1}$. Ces derniers ont été calculés grâce à l'équation 6.4.

Tableau 6.3 : Caractéristiques de la source d'iridium 192 simulée

Activité	3700 GBq
Constante k	5 (associée au film de type Fuji 100)
Énergie des photons des principales raies	0,310 MeV 0,470 MeV 0,610 MeV
Abondance des principales raies	61% à 0,310 MeV 28% à 0,470 MeV 11% à 0,610 MeV

Une fois les débits de Kerma des trois raies obtenus, il est maintenant possible d'utiliser les épaisseurs traversées afin d'obtenir les débits auxquels le film est exposé. Pour ce faire, la configuration illustrée à la figure 6.11 va être employée. Cette figure illustre tout d'abord la configuration typique d'un tuyau radiographié à l'aide d'une source radioactive. En premier lieu, le rayonnement traverse l'air entre la source et le tuyau (en rouge, distance d_1). Par la suite, le rayonnement entre dans le matériau et subit une première absorption. Notons que l'absorption dans l'air est considérée comme négligeable. Par la suite, le rayonnement traverse soit de l'air (distance d_2 , en bleu) soit du métal. S'il traverse de l'air, le rayon va entrer de nouveau en contact avec la « seconde » paroi pour être absorbé une deuxième fois. Le rayon, au sortir de cette « seconde » paroi, traverse une distance d_3 pour atteindre le film. Cette configuration requiert le calcul et le suivi des débits de Kerma par étapes. Néanmoins, il est possible de simplifier cette configuration, car les deux parois traversées sont toutes deux en acier inoxydable et que l'effet de distance parcourue est additif. Une configuration simplifiée est donc proposée à la figure 6.11. Celle-ci permet premièrement de calculer le débit de Kerma au sortir de la pièce en une seule équation puis d'appliquer une correction pour tenir compte de la distance source-film. L'équation 6.5 a été employée afin d'évaluer la

puissance du rayonnement au sortir de la pièce pour toutes les positions de réception sur le film. Cette équation tient aussi compte du rayonnement secondaire. On suppose toutefois que les rayons X produits interagissent aux mêmes endroits sur le film que les rayons gamma qui les ont générés. L'effet de bruit de ce rayonnement secondaire n'est donc pas simulé. Le coefficient B a été évalué pour toutes les épaisseurs traversées à l'aide de la droite présentée à la figure 2.6.

$$\text{Équation 6.5 : } \dot{X}_{Film} = B\dot{X}_{Source}e^{-\mu(x_1+x_2)}$$

Où B est le coefficient du rayonnement secondaire, \dot{X}_{Film} est le débit de Kerma reçu par le film, \dot{X}_{Source} est le débit de Kerma fourni par la source, μ est le coefficient d'absorption linéique, x_1 et x_2 représentent finalement les épaisseurs traversées.

Les débits de Kerma émergeant de la pièce peuvent donc être calculés pour les trois raies associées à la source d'iridium. Les coefficients d'absorption linéiques sont respectivement 0,87, 0,69 et 0,54 cm^{-1} pour les raies d'énergie de 0,310 MeV, 0,470 MeV et de 0,610 MeV. Une fois les débits sortants calculés, il faut effectuer un ajustement de ces débits de Kerma émergeant de la pièce en fonction de la distance source-film. Comme le débit de référence est fixé à 1 mètre, la correction prend la forme de l'équation 6.6. Les débits reçus par le film sont donc calculés à l'aide de l'équation 6.7 pour toutes les épaisseurs traversées modélisées à la section 6.2.1.

$$\text{Équation 6.6 : } \frac{\dot{K}_{Source-Film}}{\dot{K}_{Référence}} = \left(\frac{d_{Référence}}{d_{Source-Film}} \right)^2 = \frac{1}{d_{Source-Film}^2}$$

$$\text{Équation 6.7 : } \dot{X}_{Film} = \frac{B\dot{X}_{Source}e^{-\mu(x_1+x_2)}}{d_{Source-Film}^2}$$

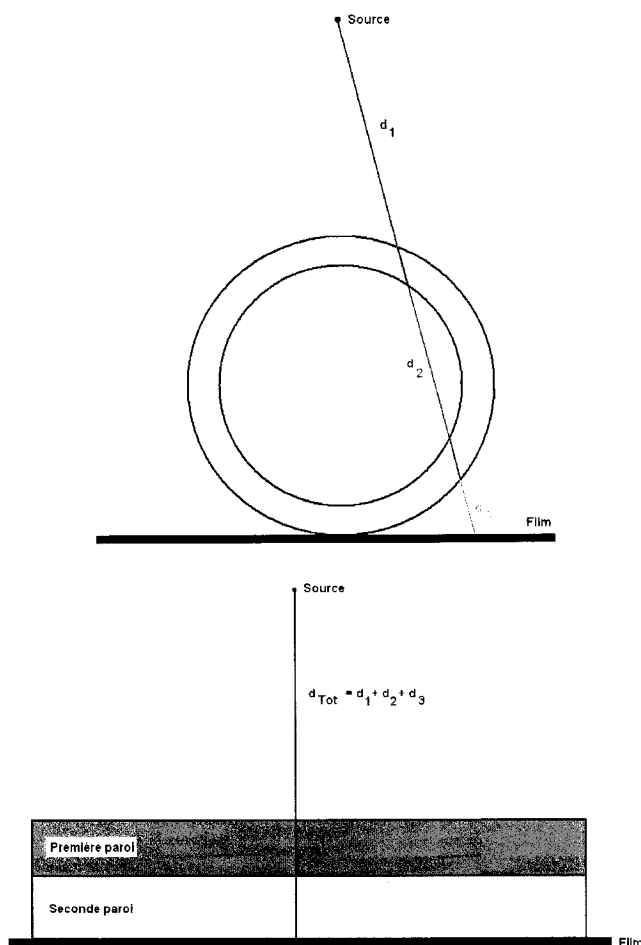


Figure 6.11 : Distances considérées dans le calcul et simplifications géométriques

Une première simulation est réalisée en utilisant un temps de radiographie de 45 secondes, ce qui est très réaliste compte tenu du type de film simulé (Fuji 100) et de la puissance de source employée. Notons que cette première simulation ne considère que la zone linéaire (zone utilisable des films) de pente $k = 5$. Les résultats sont fournis à la figure qui suit.

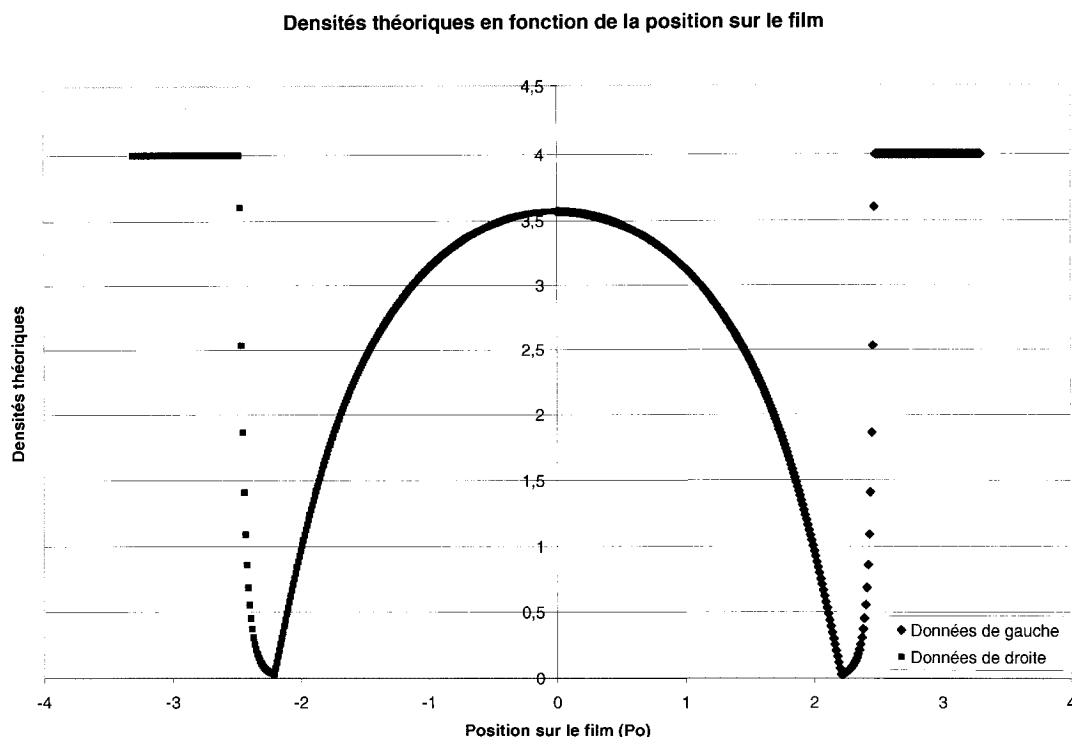


Figure 6.12 : Modélisation des densités radiographiques théoriques

Cette première modélisation montre premièrement que les zones les plus claires (densités faibles) se trouvent sous la barre de 1,5 et sont même très près de 0. Ce phénomène n'est pas représentatif des films, car une réaction chimique a lieu, même lorsque ces derniers ne sont pas exposés. Il est donc peu adéquat d'utiliser une loi « linéaire » afin de représenter toute la plage de densités à modéliser. La densité maximale monte aussi largement au-dessus de 4 pour les zones où le rayonnement ne traverse plus le tuyau. Cependant, la densité maximale du film a été fixée à 4. De plus, ces zones ne sont pas d'un grand intérêt dans cette étude. Les densités au centre sont très près de 3,75 et peuvent donc être modélisées à l'aide de la relation présentée à l'équation 6.3. Il s'avère toutefois nécessaire de corriger les zones les plus claires à l'aide d'une nouvelle équation.

Afin de pallier ce problème, la correction des zones trop peu exposées est effectuée à l'aide de 5 droites de pente inférieure à $k = 5$. Ces cinq nouvelles pentes sont mesurées directement sur les courbes fournies par les fabricants de films tels que Fuji ou Kodak. Le schéma de cette modélisation corrigée est représenté à la figure 6.13. Notons que la modélisation des densités supérieures à 3,75 a déjà été incluse dans le modèle précédent.

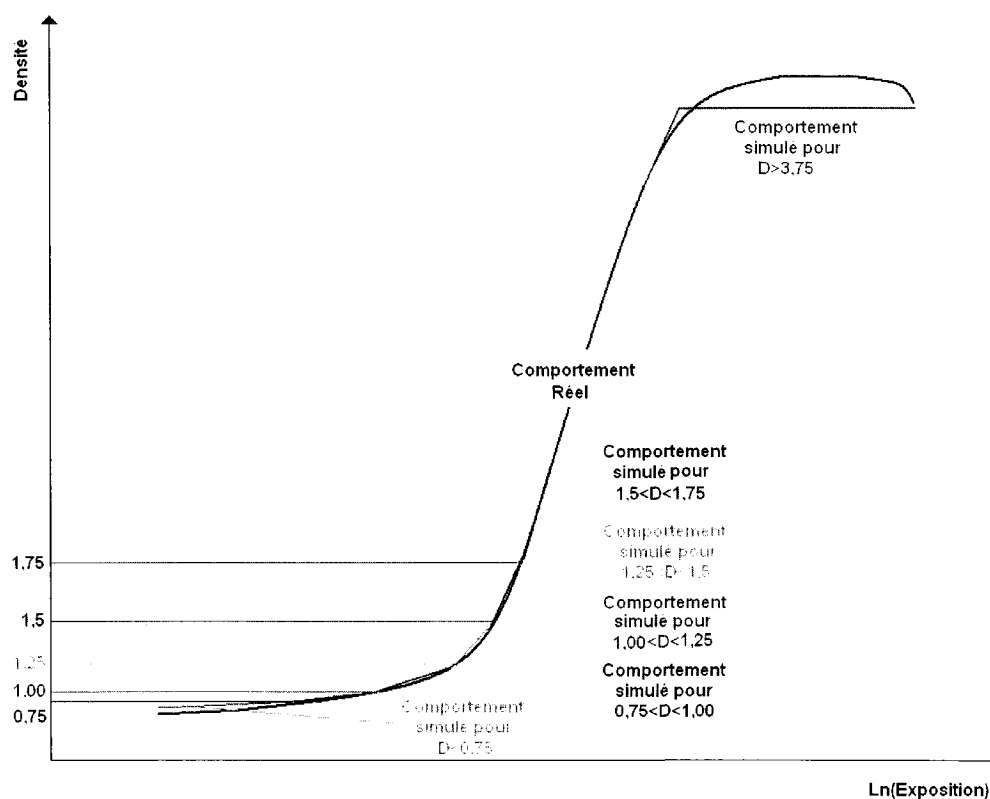


Figure 6.13 : Modélisations de la zone de faible densité

Les cinq droites ajoutées sont ensuite intégrées au premier modèle précédemment fourni en respectant toutes les conditions de continuité. Les résultats de cette nouvelle modélisation sont beaucoup plus conformes à la réalité, car les densités les plus faibles ne sont plus près de 0 (voir figure 6.14). La courbe corrigée présente

toutefois de légères discontinuités dans la nouvelle zone modélisée. Celles-ci sont causées par les calculs graphiques des cinq nouvelles pentes qui changent brusquement.

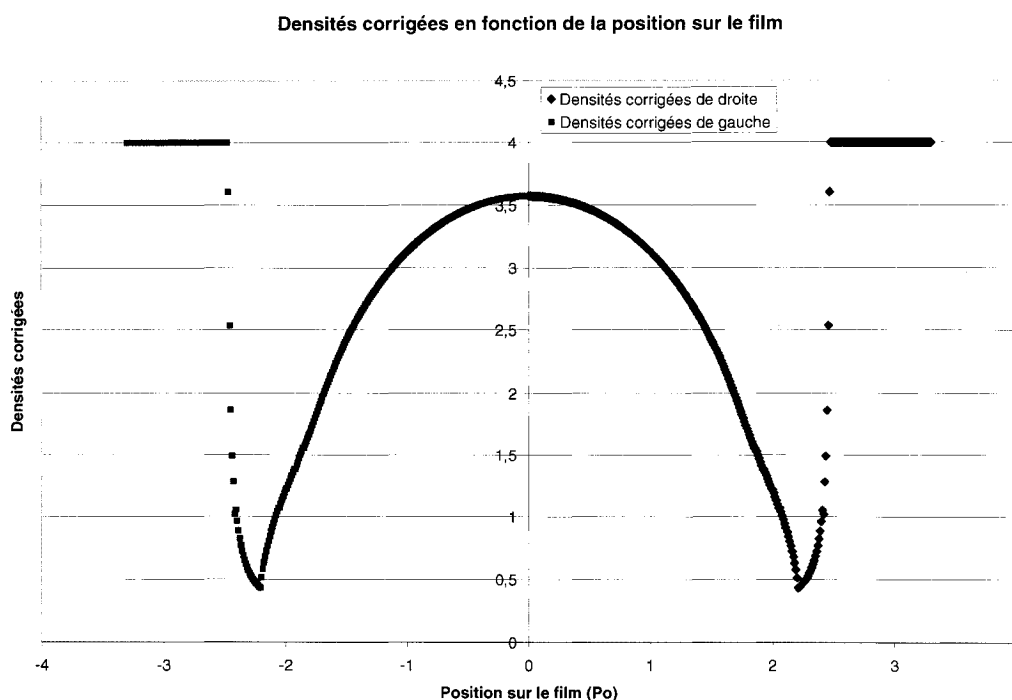


Figure 6.14 : Modélisation des densités radiographiques corrigées

Les données provenant du modèle de densité en fonction de la position dans la conduite peuvent être étudiées à l'aide de modèles de régression polynomiale de degré 4, tel qu'effectué à la section 6.1. Les résultats de ces nouvelles modélisations montrent la même tendance au niveau des résidus que celle observée précédemment (voir tableau 6.4 et figure 6.15). L'échelle est toutefois plus petite due à l'utilisation de données variant entre 0 et 4 (et non entre 0 et 255). Cette observation est très encourageante, car elle montre que la tendance au niveau des résidus risque de se retrouver dans toutes les conduites analysées.

Tableau 6.4 : Analyse de variance du modèle de densité

Effect	Analysis of Variance				
	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	337,6459	4	84,41148	121480,5	0,00
Residual	0,3030	436	0,00069		
Total	337,9489				

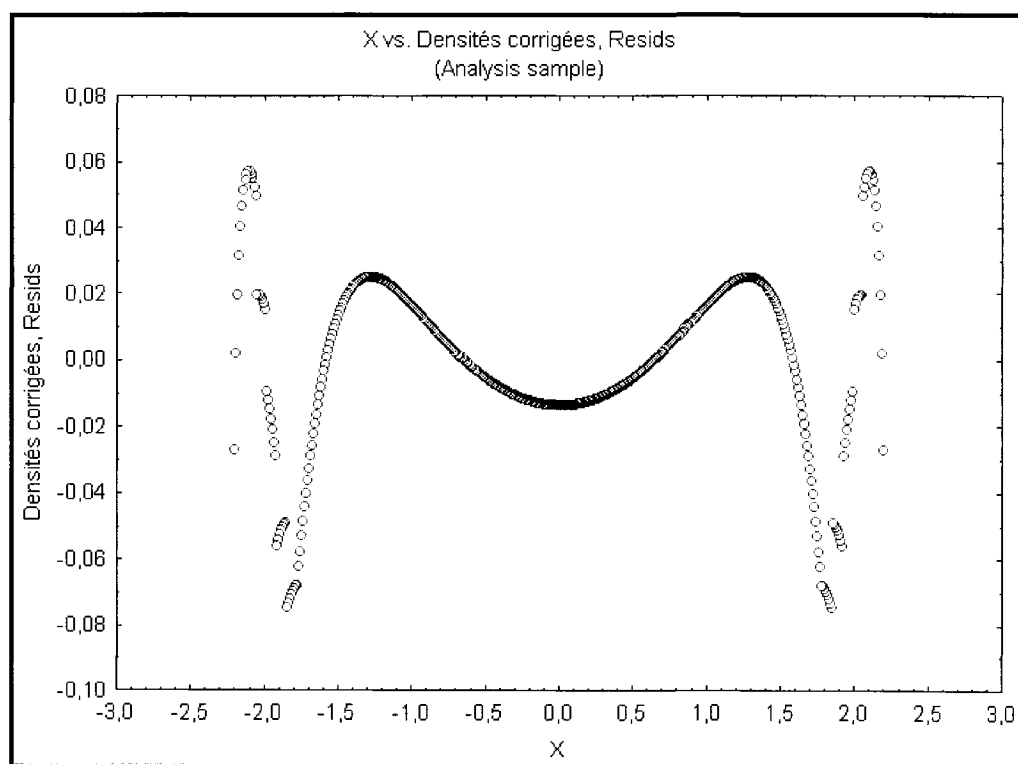


Figure 6.15 : Résidus d'un modèle polynomial d'ordre 4 des densités corrigées

6.3 Résumé des calculs

Les calculs réalisés dans la section 6 ont montré qu'il est possible d'utiliser les résidus de modèles polynomiaux de degré 4 (appliqués à des fonds d'images radiographiques) afin de détecter et de classer les mécanismes de corrosion présents dans des conduites. Cependant, plusieurs hypothèses restent à vérifier. Premièrement, les paramètres de radiographies, tels que la puissance de source et son positionnement, influencent-ils les résidus? Si c'est le cas, leurs influences peuvent-elles masquer l'effet de la corrosion?

Il est aussi nécessaire de vérifier si l'arrangement de résidus (écarts au centre et aux bords) est constant peu importe le type de conduites analysées, leur état et les paramètres employés pour les radiographier. Pour arriver à répondre à toutes ces questions, un protocole d'essais est bâti à l'aide de techniques statistiques de design d'expériences. Ces essais sont présentés dans la section qui suit.

7 ÉTUDE STATISTIQUE DU MODÈLE DE FONDS

Tel que mentionné précédemment, l'étude de radiographies digitalisées par l'analyse de leurs résidus peut s'avérer être une piste très intéressante à explorer dans le développement de méthodes permettant de caractériser la corrosion. Cette section a pour but la description des divers essais qui ont été accomplis afin de vérifier si les résidus, en se basant sur des mesures de MSE, pouvaient être employés afin de caractériser l'état de conduites ainsi que les divers mécanismes de corrosion. Les trois hypothèses de la section précédente y sont aussi étudiées. Le but visé par ces essais est de vérifier si la variable « corrosion » est celle qui possède la plus grande influence sur les MSE. Les autres variables devraient, dans un cas idéal, se comporter comme un bruit de fond négligeable.

7.1 Méthodologie expérimentale

La réalisation d'essais statistiques classiques comporte plusieurs étapes spécifiques qui confèrent aux essais et aux résultats des caractéristiques bien précises. Les méthodologies expérimentales menant aux résultats de la section 7.2 sont donc décrites de manière très détaillée afin de bien comprendre le but des expérimentations réalisées, leurs caractéristiques et les avantages que celles-ci confèrent. Une section entière est donc réservée à la description du design expérimental (section 7.1.1).

Suite à la présentation des matrices d'essais, les paramètres de radiographie, de traitements et d'analyses d'images sont présentés. Les sections 7.1.2, 7.1.3 et 7.1.4 ont donc pour buts de fournir les divers protocoles qui ont été appliqués afin d'obtenir les MSE qui sont analysés à la section 7.2.

7.1.1 Le design d'expérience

Le but général visé lors de l'utilisation et de l'application de designs d'expériences est de pouvoir faire varier plusieurs facteurs de manière simultanée et contrôlée tout en ayant un minimum d'expériences à réaliser. Ce type d'approche fournit aussi des résultats dits « équilibrés » qui permettent de déterminer les facteurs influents d'un système ainsi que les diverses interactions entre les variables. La caractéristique « d'équilibre » sera expliquée plus en détails dans cette section. Dans le cas de la radiographie, plusieurs variables peuvent influencer l'image à analyser. En tout, sept facteurs ont été retenus afin de construire la matrice. Il s'agit du type de film, de l'écart au temps optimal d'exposition, des trois paramètres de positionnement de source (position en X, en Z et la hauteur par rapport au film, Y), de la force de la source ainsi que de l'état de la conduite radiographiée (type de corrosion). Les paramètres d'essais de ces variables figurent au tableau 7.1. Ces derniers ont été retenus suite à la revue théorique de ce rapport.

Tableau 7.1 : Variables à analyser lors du design d'expérience

# de variable	Paramètres à étudier	Variations à considérer		
		Minimum	Médiane	Maximum
1	Type de film (F_t)	Film Fuji 50	Film Fuji 80	Film Fuji 100
2	Écart au temps optimal de radiographie (DT_F)	0 seconde d'écart au temps optimal calculé	10 secondes d'écart au temps optimal calculé	15 secondes d'écart au temps optimal calculé
3	Écart en X par rapport à l'axe central (DX_s)	-5 Po d'écart	0 Po d'écart	5 Po d'écart
4	Écart en Y par rapport à l'axe central (DY_s)	-5 Po d'écart	0 Po d'écart	5 Po d'écart
5	Écart à la hauteur optimale de radiographie (DZ_s)	0 Po Hauteur source-film optimale	10 Po d'écart à la hauteur optimale	15 Po d'écart à la hauteur optimale
6	Puissance de source (P_s)	Selon les sources disponibles	---	Selon les sources disponibles
7	Type de corrosion (NC/C)	Aucune corrosion (tuyau neuf)	Corrosion généralisée typique	Corrosion localisée simulée

Ces variables ont été sélectionnées pour une raison bien simple, elles peuvent toutes influencer le degré de noircissement d'un film. En premier lieu, le type de film lui-même (variable#1) est à considérer. En effet, les films de marque Fuji 50, de par leur nature, possèdent un contraste supérieur aux films de type Fuji 100. Cependant, ils peuvent plus difficilement représenter de grandes variations d'épaisseurs. Ce type de film peut ainsi mieux représenter les variations au niveau des fonds, mais génère une plus grande perte d'information au fur et à mesure que l'on se rapproche des parois.

Cette variable a ainsi une influence potentielle sur les images obtenues qui doit être évaluée. Notons que le type de film est aussi une variable dite contrôlable. Les influences de celui-ci sur les résidus et les résidus moyens sont donc tolérables. Il en est de même pour l'effet possible d'effectuer toutes les inspections à l'aide d'un seul type de film. Ce n'est pas le cas des paramètres de positionnement (variables #3 à #5) qui sont très souvent fixés par les conditions industrielles. Il n'est pas rare pour les inspecteurs de travailler dans des zones où le dégagement ne permet pas d'utiliser la hauteur optimale prescrite par les normes. Il est aussi possible de radiographier des conduites avec présence d'isolant qui ne permet pas de s'assurer d'avoir une source bien centrée sur le tuyau et le film. Comme les paramètres de positionnement influencent « l'éclairage », il est possible qu'ils fassent varier les résidus obtenus de modélisations de fonds. Ces trois paramètres sont donc inclus dans les essais.

La puissance de source peut, à la limite, être contrôlée, mais cette variable dépend des sources disponibles et il est difficile, voir même impossible, d'effectuer plusieurs inspections à puissance constante. Tel que mentionné à la section théorique (voir 2.3.1), la puissance de source influence aussi la quantité de rayon X (bruit) généré dans une pièce. Une source plus puissante pourrait fournir, en théorie, une radiographie moins bruitée. Des interactions avec plusieurs autres variables, tels que le positionnement de la source et du film, sont aussi à considérer. Cette variable est donc incluse dans le design.

Finalement, l'effet de deux variables reste à être analysé. Il s'agit de l'effet de la corrosion et de l'écart au temps d'exposition optimal calculé. Elle représente simplement l'écart à un temps optimal calculé dû à un oubli de la part des techniciens. Généralement, ce dernier ne devrait pas dépasser 15 secondes. Un tel oubli peut faire grandement varier la densité d'un film à un autre et ce phénomène peut être la source de différences non négligeables au niveau des résidus. Pour ce qui est de la corrosion, c'est elle que l'on cherche à modéliser et à représenter. Cette variable est donc la plus

importante du design. En bref, pour que la technique MSE soit valable, deux variables devraient être jugées comme significatives et importantes soit : la corrosion ainsi que le type de film.

En observant les variables présentées au tableau 7.1, il est possible de voir que la plupart d'entre elles pourraient être variées selon trois modalités soit : une valeur minimale, une valeur médiane et une valeur maximale. Il n'y a que la puissance de source qui peut difficilement être variée de la sorte. Celle-ci prend donc deux modalités soit : un maximum et un minimum. Heureusement, il existe un type de design statistique qui s'adapte à cette réalité. Celui-ci ne demande que 18 essais par matrices. Deux répétitions sont aussi prévues afin de bien analyser les phénomènes alors 54 essais sont à prévoir (3 matrices d'essais au total). Un plan complet aurait demandé $3^6 \times 2^1$ essais soit 1458 essais par matrice et 4374 essais avec deux répétitions. Le design employé génère donc une importante économie en ce qui a trait aux essais expérimentaux, mais cette caractéristique a un prix. En effet, un design à 54 essais ne permettra pas de résoudre les divers effets d'interactions, mais uniquement ceux associés aux variables principales. Toutefois, cette résolution est amplement suffisante, car le but de ces essais est de vérifier s'il n'y a que la corrosion qui possède une influence importante et significative sur les résidus. L'étude des effets d'interactions est donc peu intéressante à ce stade du projet. Les matrices générées figurent au tableau 7.2. Les deux autres matrices sont semblables à la première toutefois, l'ordre des essais n'y est pas le même. Ce phénomène est retrouvé tant au niveau de la deuxième et de la troisième matrice. Le tableau 7.3 illustre l'ordre des essais par rapport à la matrice A. Ce changement d'ordre est voulu et appelé randomisation. L'ordre des essais des matrices A, B et C est donc attribué au hasard. Cette randomisation est exécutée afin de répartir l'influence d'effets d'encrassement non contrôlables de manière aléatoire. En bref, la randomisation permet de minimiser l'influence de variables non contrôlables et parfois non connues sur la réponse mesurée.

Tableau 7.2 Matrice des 18 essais randomisés

Psource	Type Film	Delta X ¹	Delta Y ¹	Delta Z ¹	Delta t ¹	NC/C ²	No
MAX	F80	-5 Po	0 Po	15 Po	0 Sec	C Loc	MA1
MIN	F80	-5 Po	-5 Po	10 Po	10 Secs	C Loc	MA2
MIN	F50	-5 Po	-5 Po	0 Po	0 Sec	NC	MA3
MIN	F50	0 Po	0 Po	10 Po	10 Secs	C Gen	MA4
MAX	F100	-5 Po	5 Po	10 Po	15 Secs	NC	MA5
MIN	F100	5 Po	-5 Po	15 Po	10 Secs	NC	MA6
MAX	F80	5 Po	-5 Po	10 Po	15 Secs	C Gen	MA7
MAX	F50	5 Po	0 Po	10 Po	0 Sec	NC	MA8
MIN	F80	5 Po	5 Po	0 Po	0 Sec	C Gen	MA9
MAX	F50	0 Po	-5 Po	0 Po	15 Secs	C Loc	MA10
MAX	F80	0 Po	5 Po	0 Po	10 Secs	NC	MA11
MIN	F80	0 Po	0 Po	15 Po	15 Secs	NC	MA12
MIN	F50	5 Po	5 Po	15 Po	15 Secs	C Loc	MA13
MIN	F100	0 Po	5 Po	10 Po	0 Sec	C Loc	MA14
MAX	F100	0 Po	-5 Po	15 Po	0 Sec	C Gen	MA15
MIN	F100	-5 Po	0 Po	0 Po	15 Secs	C Gen	MA16
MAX	F100	5 Po	0 Po	0 Po	10 Secs	C Loc	MA17
MAX	F50	-5 Po	5 Po	15 Po	10 Secs	C Gen	MA18

¹ Les écarts à la distance optimale, aux positions en X, Y et Z ainsi qu'au temps d'exposition sont sujet à des changements effectués lors des expérimentations

² NC = tuyau non corrodé, C Gen = Présence de corrosion généralisée,
C Loc = présence de corrosion localisée

Tableau 7.3 : Ordre des essais par rapport à la matrice A

Essais Matrice A	Essais Matrice B	Essais Matrice C
MA1	MB14	MC12
MA2	MB4	MC2
MA3	MB3	MC7
MA4	MB7	MC5
MA5	MB16	MC13
MA6	MB18	MC11
MA7	MB15	MC8
MA8	MB6	MC14
MA9	MB9	MC4
MA10	MB10	MC16
MA11	MB2	MC1
MA12	MB12	MC17
MA13	MB11	MC9
MA14	MB13	MC3
MA15	MB17	MC6
MA16	MB8	MC18
MA17	MB1	MC15
MA18	MB5	MC10

En observant la matrice A, il est possible de s'apercevoir que chaque variable varie d'une modalité à une autre de manière bien déterminée. Par exemple, le film Fuji 50 est employé 6 fois et il en va de même pour les deux autres types de film. La matrice est dite équilibrée, car on n'y retrouve pas d'effet de variabilité prenant racine dans un nombre inégal de modalité. Cet équilibre, ainsi que la variation simultanée de toutes les variables, permet de bien déterminer l'effet de chacune des variables sur la réponse mesurée sans inclure d'effets inhérents aux matrices d'essais.

En dernier lieu, il est nécessaire d'identifier une ou des variables réponses (les Y) à mesurer. C'est à partir de ces réponses que s'effectueront toutes les analyse reliées au design d'expérience. Tel que mentionné précédemment, ce sont les erreurs moyennes provenant des sommes de carrés des résidus qui ont été choisies (MSE). On suppose ici que l'erreur moyenne représente fidèlement le comportement global des résidus. La

méthode employée afin d'obtenir les divers MSE est décrite aux sections qui suivent. Il faut toutefois ajouter que beaucoup d'autres caractéristiques peuvent être mesurées au niveau des résidus, tels que la variabilité, les variations locales, etc. Néanmoins, ce travail ne va considérer que le signal « moyen » en supposant que ce dernier représente fidèlement le comportement global des résidus.

7.1.2 Paramètres de radiographie

La réalisation des expériences prévues par le design a présenté certains problèmes qui ont demandé une bonne adaptation et une re-vérification de la théorie de la radiographie. Le principal d'entre eux a été relié à l'identification et à l'utilisation des sources radioactives. Il a tout d'abord été nécessaire d'identifier deux puissances de sources réalistes. Ces dernières ont été fixés à environ 63 et 27 curies. Un premier problème concerne la source de 27 curies, car en radiographiant avec cette dernière, il est impossible de réaliser les essais en une seule journée. Il faut donc tolérer une variation de la puissance de source dans le temps due à sa décomposition naturelle. De plus, les sources sont parfois utilisées par des techniciens lors de projets externes et il s'avère difficile d'effectuer toutes les expérimentations avec les deux mêmes sources radioactives. La priorité a donc été fixée sur la puissance de la source. Ce choix a une conséquence. Tel que mentionné aux sections 2.3.1 et 2.3.3, les sources possèdent une certaine taille qui provient des disques d'iridium utilisés pour leur fabrication. Cette taille est caractérisée par une diagonale. Les fournisseurs et fabricants de sources n'utilisent pas un nombre de disques fixes, mais une activité fixe ce qui fait que deux sources de même activité peuvent avoir des diagonales différentes. En priorisant la puissance de source, la hauteur optimale peut donc varier d'une matrice à une autre et on suppose que ce phénomène n'entraîne pas de conséquence importante. En effet, cette supposition se base sur le fait que le calcul du temps optimal sera simplement ajusté aux nouvelles hauteurs. De tels changements font aussi varier les facteurs d'agrandissements, mais il est possible d'ajuster les images en conséquence. Les essais

ont demandés trois jours pour être réalisés. Les sources de puissances maximales employées avaient des activités de 63,4 Curies pour les matrices A et B et de 55,6 Curies pour la matrice C. Les sources les plus faibles avaient quant à elles des activités de 27,2 Curies pour les matrices A et B et de 27,7 Curies pour la matrice C. Les données relatives aux sources sont toutes présentées au tableau 7.4.

Tableau 7.4 : Données relatives aux sources employées

Matrice	Puissance de source (Curies)	Diamètre de source (mm)
Matrices A et B	63,4	3,988
Matrices A et B	27,2	3,835
Matrice C	55,6	3,988
Matrice C	27,7	3,760

Il est aussi à noter que toutes les expérimentations ont été effectuées à l'aide d'un appareil qui permet un positionnement précis de la source au-dessus du film. Des plaques de plomb ont aussi été ajoutées sous les films et au pourtour des pièces en acier constituant le support de la conduite. Ces plaques ont pour but de minimiser le rayonnement X secondaire provenant du système de support.

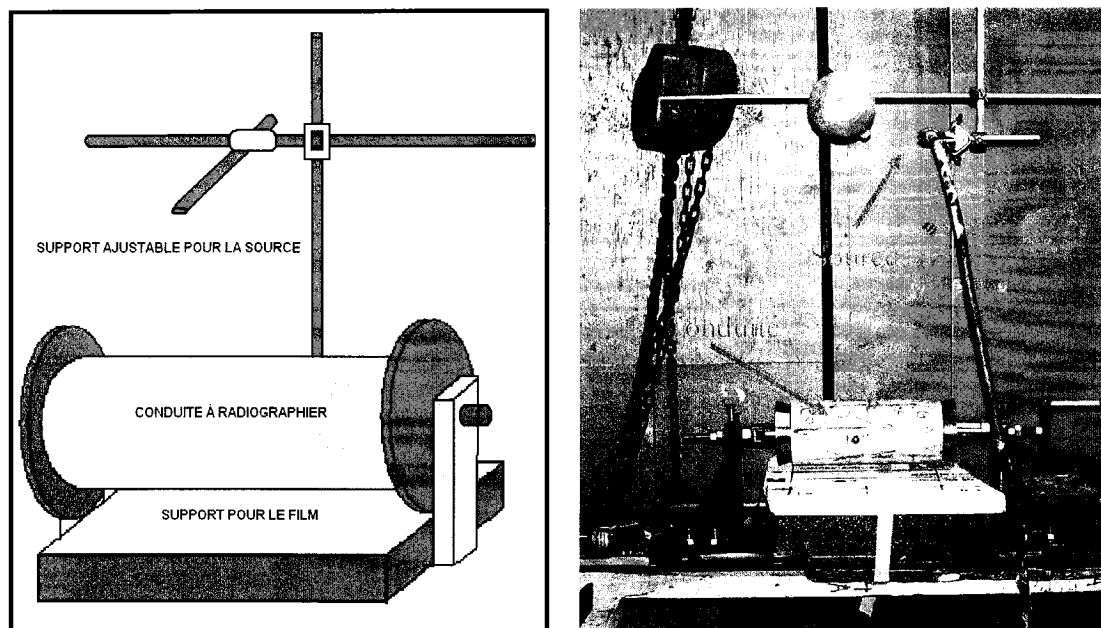


Figure 7.1 : Montage expérimental

Toutes les radiographies ont aussi été réalisées avec un standard de résolution « à fils » (IQI) (voir figure 7.2). Ce dernier permet à la fois de connaître la profondeur et la distance résolue pour les diverses conditions d'expérimentations. Ce standard a été radiographié sur une plaque d'acier de 12,7 mm (0,5 Po) qui représente l'épaisseur traversée au fond du tuyau (épaisseur traversée la plus faible). L'utilité de ce standard sera clarifiée lors des sections suivantes.

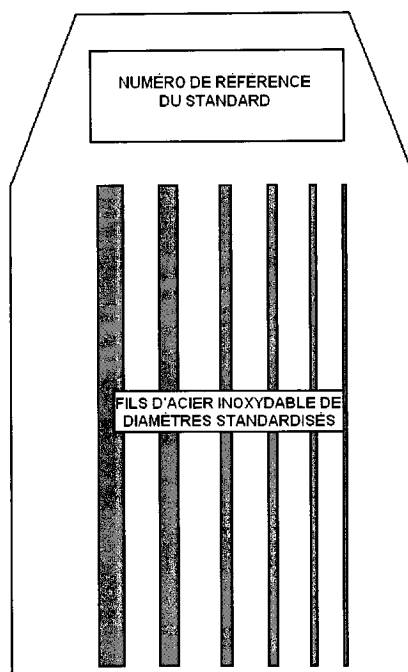


Figure 7.2 : IQI à fil

7.1.3 Numérisation et traitement des films digitalisés

Une fois les essais réalisés et les films développés, il devient possible de procéder à l'étape de digitalisation et d'analyse des films numérisés. Notons que, tout au long des étapes expérimentales, une attention particulière a été portée à la propreté et à l'intégrité des films. Tel qu'effectuée pour les essais précédents, les films ont été digitalisés à l'aide d'un appareil de marque Lumisys et sauvegardés sous forme de fichiers bitmap. Ce type de fichier a été employé afin de conserver toutes les informations relatives aux images, sans compression. Les images ont aussi été travaillées à l'aide des logiciels Photoshop et Image Tool 3.0 pour obtenir des fichiers de forme JPEG et bitmap.

Le but de ces premières transformations est d'obtenir des fichiers analysables par Image Tool 3.0 (les JPEG). Ce paragraphe contient plus de détails quant aux

transformations effectuées sur les images. Le logiciel Image Tool 3.0 est premièrement employé afin de mesurer les diamètres externes des tuyaux visibles sur les images et de calculer leurs facteurs d'agrandissements. Une fois ce facteur obtenu, il devient possible, à l'aide du logiciel Photoshop, de retravailler les images originales et de modifier la taille de celles-ci fin d'obtenir des tuyaux radiographiés dont les diamètres sont équivalents. Pour ce faire, le tuyau le moins grossi est identifié et tous les autres tuyaux sont réduits à la taille du plus petit diamètre image observé. Cette opération est effectuée pour toutes les 54 radiographies. Notons que ces premières mesures sont toutes effectuées en pixels. Une fois la taille des images de tuyaux normalisés, ces dernières subissent une rotation qui permet de placer les parois externes (non corrodées) en une position parfaitement horizontale. Finalement, les images initiales, de type « couleur », sont transformées en images noir et blanc (tons de gris). Elles sont ensuite sauvegardées sous forme jpeg et bitmap.

7.1.4 Traitements des données et calcul des MSE

Une fois les images traitées, il devient possible d'y puiser des données et de les analyser. Les opérations précédentes ont permis de normaliser la taille des défauts analysés et d'éliminer l'influence potentielle du facteur d'agrandissement sur la réponse. C'est pourquoi les radiographies ont été prises à puissance de source constante. Il devient maintenant possible de prendre diverses mesures transversales au niveau des images. En premier lieu, la position du centre de chaque tuyau (sur les radiographies) est identifiée et trois lignes d'une largeur d'un pixel sont mesurées par tuyau à l'aide du logiciel Image Tool 3.0. Ces lignes ont pour but de relier une position et une intensité de pixel en niveau de gris et elles sont mesurées de manière perpendiculaire aux parois. Une des trois lignes est prise directement au centre alors que les deux autres lignes sont mesurées à +100 et -100 pixels de cette position. Dans le cas particulier de la corrosion localisée, la position des lignes n'est pas fixe, mais les trois mesures sont effectuées dans un intervalle ± 100 pixels autour du centre du tuyau. La raison de cet écart est que les

lignes à mesurer doivent passer par une quantité suffisante de piqûres, car le reste du tuyau est intact. Si l'analyse n'est pas effectuée sur des piqûres, les résultats seront identiques à ceux provenant d'un tuyau non corrodé. Les lignes traversent tous les tuyaux de manière transversale (voir figure 7.3, à l'extérieur de la délimitation externe). En ce qui a trait aux tuyaux non corrodés, deux autres lignes sont mesurées en bordure des images pour évaluer l'effet de position de prise de mesure.

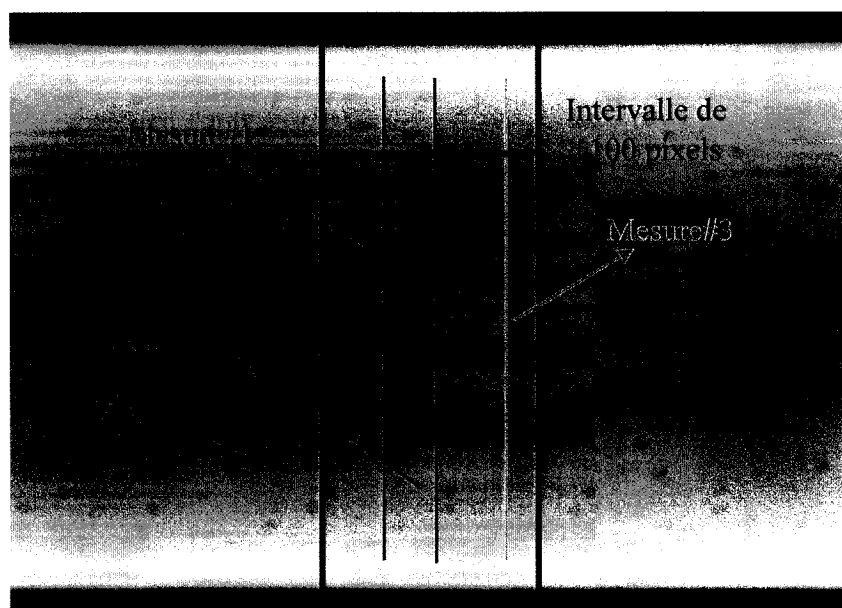


Figure 7.3 : Délimitation des parois d'un tuyau radiographié

Tel que mentionné au paragraphe précédent, un effet de position de prise de mesure est évalué à partir de conduites non corrodées. Ceci permet d'obtenir l'effet d'une telle variable sans inclure une influence due aux variations retrouvées dans les structures de corrosion. Dans ce cas, les lignes mesurées se situent au quart et au trois quart de la longueur totale du tuyau afin d'obtenir des profils de résidus aux extrêmes gauches et droites des conduites.

Une fois les profils enregistrés, il est possible d'utiliser le logiciel Excel afin de travailler les données. Les fichiers fournis par Image Tool 3.0 donnent un point mesuré

pour chaque pixel repéré. Or, le travail effectué sur les images a modifié la taille des pixels et chaque image possède une taille de point qui lui est propre. Il faut donc tenir compte de ce phénomène lors de l'analyse des images. Cette caractéristique prend toute son importance lors de la mesure de la résolution. En effet, la résolution est caractérisée par la taille du plus petit fil visible sur le standard IQI présenté à la section 7.1.2. Chaque image possède à la fois une résolution et une taille de pixel qui lui est propre. Il est donc bien important de mesurer la taille en pixels du plus petit fil visible sur chaque image. Cette taille sera employée plus tard au niveau du traitement des données.

Comme les profils contiennent des données qui sont situées à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de la paroi externe des tuyaux, il faut procéder à l'élimination de certains points non pertinents. Les points ne représentant pas les fonds d'images sont tout d'abord éliminés, tel qu'expliqué aux sections 6.1 et 6.2.1. Cette procédure est effectuée directement sur les données compilées dans le logiciel Excel. Tel que mentionné précédemment, le maximum de luminance, qui est associé à la zone la plus épaisse traversée par les rayons gamma, est employé afin de fixer les bornes intérieures des données à analyser. Une fois le maximum identifié pour chaque paroi, dix pixels supplémentaires sont effacés (en allant vers l'intérieur du tuyau sur l'image) afin de s'assurer d'avoir éliminé toutes les données relatives aux parois. Une fois ce premier traitement réalisé, il ne reste que des données de fonds d'images au niveau des fichiers. C'est à ce niveau que la résolution de l'image est considérée. Afin d'effectuer des analyses réalistes, il faut éliminer les pixels qui représentent, théoriquement, la même information.

En effet, les divers paramètres employés afin de radiographier une image fixent un niveau de résolution donné. Par exemple, prenons le cas d'une pièce radiographiée sur laquelle il est impossible de distinguer deux objets différents et distant d'un millimètre, conserver tous les pixels pour des fins d'analyses s'avère inutile. Pour une telle image, les pixels analysés devraient tous être distancés de 1 mm les uns des autres.

Les données « images » à traiter dans le cadre de ce design d'expérience subissent un tel type de traitement. Les tailles des derniers fils visibles des standards IQI, employés au niveau des radiographies, sont transformées en nombres de pixels grâce à la connaissance de la résolution des images. Le nombre de pixels compté, qui varie en fonction des fils visibles et de la résolution, se situe toujours entre 4 et 6 pixels. Cependant, la résolution de la plupart des images est très souvent de 4 pixels. Un point sur quatre est donc conservé pour la majorité des images alors que sur d'autres, on conserve 1 point sur 5 ou sur 6.

Une fois ce traitement appliqué, une nouvelle échelle est utilisée afin d'analyser les données et d'en extraire les MSE, tel que spécifié à la section 6.1. Cette échelle symétrique centre les données en tons de gris sur $X = 0$. Une fois toutes ces opérations effectuées, il est possible d'utiliser le logiciel Statistica et de faire passer un modèle de degré 4 au niveau de toutes les données recueillies. Ce type de modèle engendre certains problèmes et diverses imprécisions, tel que spécifié tout au long de la section 6. Toutefois, des moyens d'améliorer la modélisation seront développés plus tard dans ce document. Les résultats des essais, en terme de MSE moyens bruts, figurent à l'annexe 8. Rappelons qu'il n'y a que les MSE moyens qui ont été utilisés lors des analyses du design. Ces MSE moyens sont tirés des trois lignes analysées sur chaque image.

7.2 Résultats des essais

Cette section comporte les cinq principales analyses statistiques qui ont été réalisées afin d'identifier les variables influentes. Les données provenant directement du design seront tout d'abord analysées. Par la suite, une analyse par régression sera effectuée afin d'apporter certaines informations complémentaires à l'analyse initiale. Une analyse de variance sera aussi effectuée afin de vérifier si la variance se comporte comme un « bruit de fond ». Finalement, deux analyses ANOVA seront étudiées afin de vérifier si la position de prise de mesure et la densité des films influencent les MSE.

7.2.1 Analyses directes du design

Le premier graphique à analyser dans cette section est celui du rapport signal sur bruit provenant de l'analyse directe du design d'expériences (voir figure 7.4). Ce dernier est en fait une représentation des rapports des effets moyens respectifs des variables sur la réponse, divisés par la variance. Notons toutefois que les analyses ont été effectuées à l'aide du logarithme naturel des MSE moyens. Le but de cette opération est simplement d'obtenir des résidus conforme, de variabilité constante et pouvant être modélisés à l'aide de la loi gaussienne. Cette transformation est de type « Box-Cox » et a été appliquée parce qu'elle engendrait un minimum au niveau de l'écart type des résultats.

La figure 7.4 montre tout d'abord que la variable « corrosion » a un effet très significatif sur la réponse. Les variables matrice (l'effet de la répétition des essais), type de film et écart au temps optimal semblent aussi être influentes. Toutes les autres variables semblent moins significatives, car leurs rapports signal sur bruit sont bien contenus dans $\pm 2\sigma$. Cette première observation est encourageante, car la variable corrosion est très importante. Cependant, d'autres analyses doivent être effectuées avant de poser des conclusions définitives.

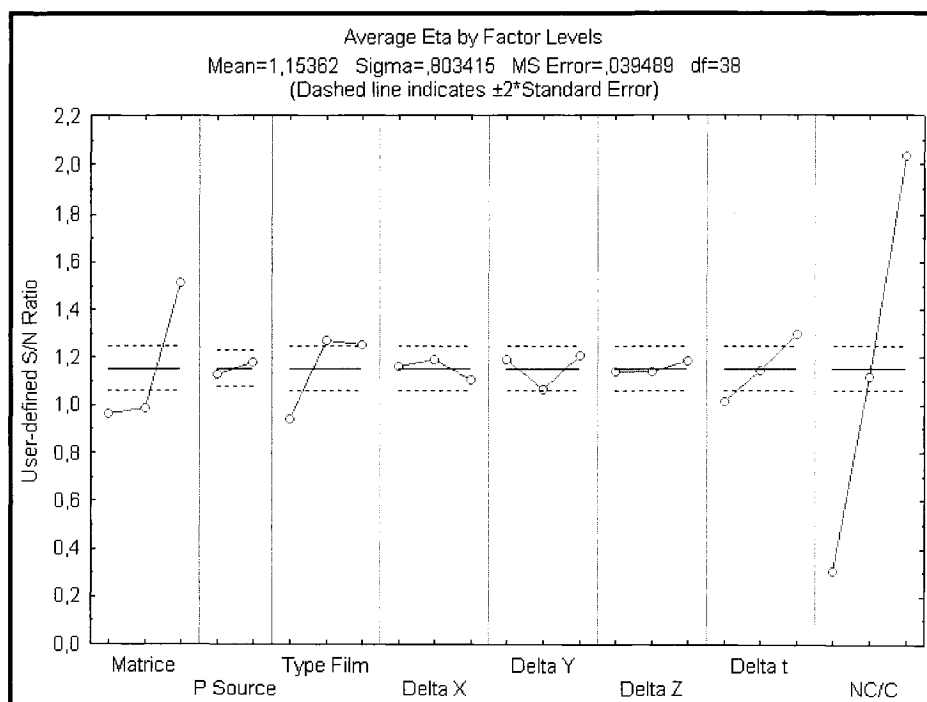


Figure 7.4 : Analyse graphique du rapport signal sur bruit

Une analyse de variance plus détaillée peut aussi être effectuée (voir tableau 7.5). Cette dernière montre encore une fois que les MSE moyens sont, en grande partie, influencés par la corrosion présente dans les tuyaux. Le jugement des variables est effectué en fonction de leurs p-values respectifs. En plus de la variable corrosion, on note comme significative la variable « type de film ». L'écart au temps optimal pourrait aussi être considéré comme potentiellement important. La corrosion, à elle seule, explique environ 79% de la variabilité totale du système. Si on ajoute le type de film, environ 82% de la variabilité observée au niveau des MSE est expliquée à l'aide de ces deux variables combinées, ce qui est très encourageant. Cependant, l'écart au temps optimal de radiographie influence les MSE de manière significative. Heureusement, cette variable n'explique que 2% de la variabilité totale, ce qui est beaucoup moins important que la corrosion et le type de films réunis.

Il reste toutefois un effet « matrice » important qui explique 10% de la variabilité. Il y a donc des différences importantes et significatives entre les trois

matrices d'essais. Une analyse effectuée sans la matrice C montre l'absence de l'influence d'une telle variable. D'autres analyses seront effectuées afin d'identifier d'où peut provenir l'influence d'un tel effet. Il est toutefois possible d'employer un graphique appelé « x barre et s » afin de vérifier si les essais sont « en contrôle » d'une matrice à une autre. Celle-ci (voir figure 7.5) montre qu'il semble exister une différence entre la matrice C et les deux autres, mais que les essais sont bien « en contrôle ». En effet, le graphique du bas de la figure 7.5, qui représente la variabilité, montre que les résultats des essais (points et droite en bleu) sont bien situés dans les limites tolérables (deux lignes en rouge). Il en va de même avec l'autre graphique qui représente les moyennes. Les écarts ne sont donc pas dus à des imprécisions reliées aux essais, mais bien à l'effet d'une variable (ou d'une groupe de variables) inconnue.

Tableau 7.5 : Analyse de variance des résultats directs du design

Effect	Analysis of Variance				
	Mean = 1,15362 Sigma = ,803415				
	SS	df	MS	F	p
{1}Matrice	3,50853	2	1,75426	44,4242	0,000000
{2}PSource	0,03155	1	0,03155	0,7990	0,377021
{3}Type Film	1,24389	2	0,62194	15,7498	0,000010
{4}DeltaX	0,06302	2	0,03151	0,7979	0,457653
{5}DeltaY	0,21454	2	0,10727	2,7165	0,078942
{6}DeltaZ	0,02242	2	0,01121	0,2839	0,754396
{7}Deltat	0,72155	2	0,36078	9,1361	0,000576
{8}NC/C	26,90412	2	13,45206	340,6537	0,000000
Residual	1,50058	38	0,03949		

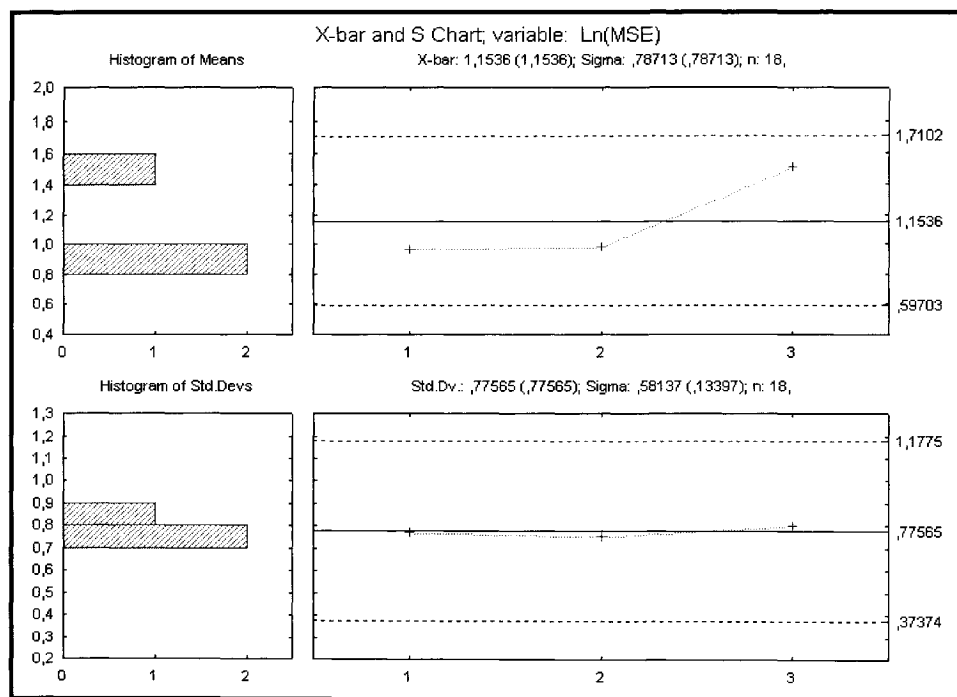


Figure 7.5 : Carte de contrôle x-bar et s

7.2.2 Analyses des effets par modèle de régression

D'autres analyses peuvent aussi être réalisées à l'aide de modèles de régressions linéaires. L'effet des variables est ici évalué en relation directe avec les MSE moyens. Le rapport signal sur bruit n'est donc plus considéré. Un modèle de régression linéaire générale est utilisé afin de vérifier l'effet potentiel des diverses variables, énumérées au tableau 7.1, sur les MSE moyens mesurés. Le type de film, la corrosion, la puissance de source et la matrice sont considérés comme qualitatives alors que les paramètres de positionnement et de temps de radiographie sont quantitatifs. Notons toutefois qu'une analyse de régression à l'aide de facteurs purement quantitatifs (codage, de 1 à 3) donne les mêmes résultats. Les premiers résultats de l'application d'un tel modèle sont répertoriés au tableau 7.6. Ce dernier montre des résultats similaires à l'analyse directe du design. La « corrosion » possède un p-value très faible, ce qui en fait une variable très

significative. Sa somme de carrés est aussi très importante par rapport à la somme de carrés totale. De plus, il est toujours possible de noter la présence du type de film, de l'écart au temps d'analyse et de l'effet matrice.

Tableau 7.6 : Analyse de variance du modèle de régression

Effect	Univariate Results for Each DV Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	Degr. of Freedom	Ln(MSE) SS	Ln(MSE) MS	Ln(MSE) F	Ln(MSE) p
Intercept	1	11,38448	11,38448	266,6525	0,000000
P Source	1	0,03155	0,03155	0,7390	0,394858
Type Film	2	1,24389	0,62194	14,5674	0,000016
NC/C	2	26,90412	13,45206	315,0801	0,000000
Matrice	2	3,50853	1,75426	41,0892	0,000000
Dx	1	0,02803	0,02803	0,6566	0,422325
Dy	1	0,00242	0,00242	0,0567	0,812995
Dz	1	0,01390	0,01390	0,3255	0,571353
Dt	1	0,68462	0,68462	16,0354	0,000248
Error	42	1,79315	0,04269		
Total	53	34,21021			

Une analyse de résidus est ici effectuée afin de montrer l'utilité du logarithme naturel et la validité du modèle précédemment analysé. Premièrement, si on analyse des résultats calculés à partir des MSE non transformés, on obtient la figure 7.6 qui montre une évolution très importante des résidus en fonction des valeurs prédites. Les résidus dont la valeur prédite est faible (entre 0 et 2, correspondant à un tuyau non corrodé) possèdent une variance plus faible, car toutes les données sont agrégées dans une plage très restreinte. Les données ayant des MSE très grands (entre 8 et 10, associés à la corrosion localisée) montrent toutefois un grand « étalement ». La forme de type « triangulaire » (en rouge) de la figure 7.6 est très typique aux cas de variance non constante. Cette caractéristique de la variance doit être corrigée afin d'obtenir des résultats valides au niveau de l'analyse par régression et de l'analyse directe du design. Une variance non constante pourrait entraîner la sélection de variables non significatives

ou encore, l'élimination de variables normalement importantes à la modélisation. Le logarithme naturel est utilisé afin d'éliminer ou de réduire l'effet de cette tendance.

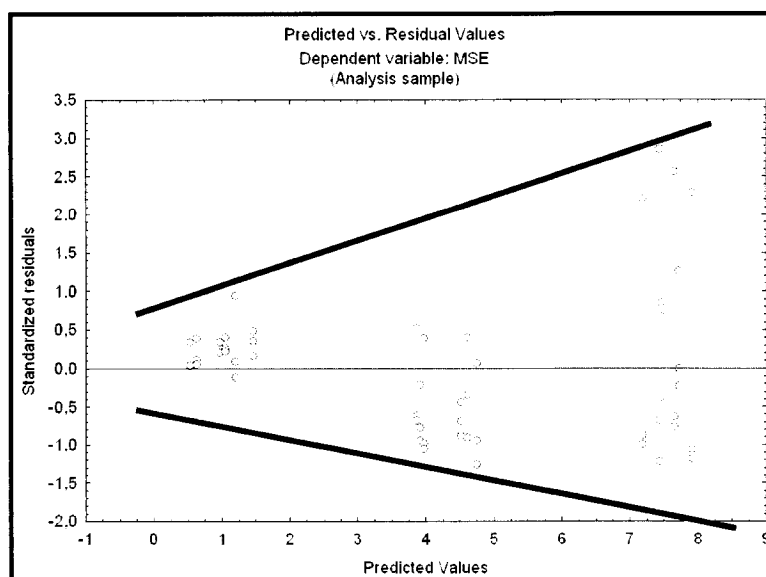


Figure 7.6 : Distributions de résidus normalisés sans logarithme

L'application du logarithme naturel sur les données stabilise la variance et permet l'utilisation des modèles de régression. Tel qu'observé à la figure 7.7 (en rouge), l'application d'un logarithme naturel au niveau des MSE génère une distribution qui est rectangulaire. L'application de ce dernier règle donc efficacement le problème d'instabilité de variance. De plus, il est possible de noter qu'aucun point ne s'éloigne de l'intervalle compris entre -2 et 2. Aucune donnée aberrante ou suspecte n'est donc détectée au niveau des résidus.

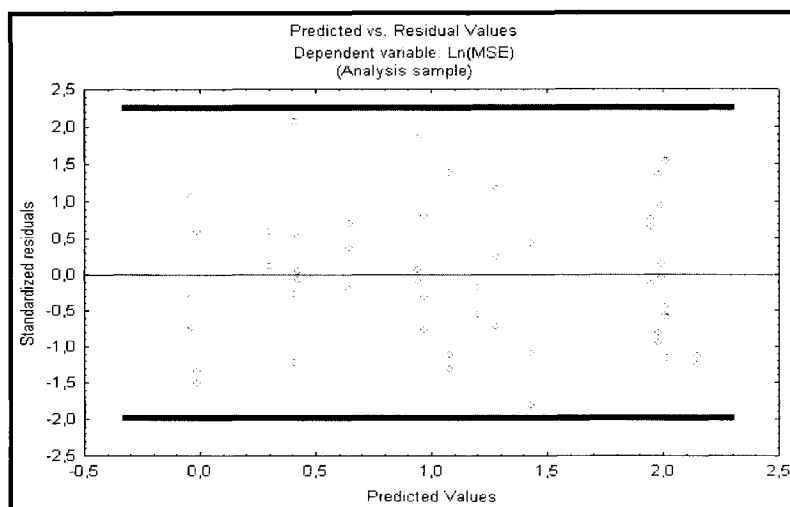


Figure 7.7 : Distributions de résidus normalisés avec logarithme

Un diagramme normal quantile montre aussi que les résidus peuvent être modélisés par une distribution normale. Les conclusions précédentes, basées sur les p-values, sont donc adéquates (figure 7.8). Ce graphique est aussi accompagné d'un test de Shapiro-Wilk qui, lui aussi, valide l'hypothèse de normalité des résidus de par son p-value élevée ($p = 0,5916$).

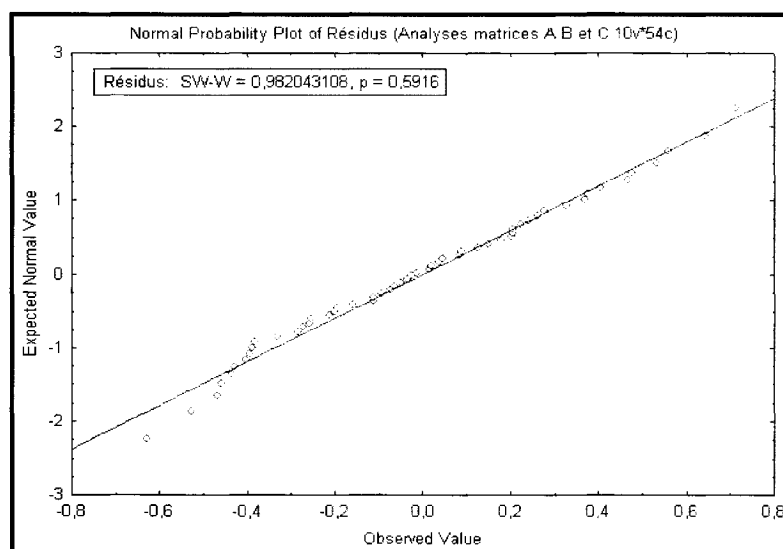


Figure 7.8 : Diagramme normale-quantile

Finalement, la figure 7.9 permet d'étudier les résidus studentisés en fonction des résidus studentisés supprimés. Le but du graphique représenté à cette figure est de détecter la présence de points influents c'est-à-dire, de données, qui par leur présence, changent dramatiquement le modèle obtenu. Dans le cas des essais réalisés dans ce travail, tous les points observés sont bien alignés selon une droite. Il est donc possible d'affirmer qu'il y a absence de points influents dans le système. Mentionnons finalement qu'il existe d'autres techniques plus précises permettant d'identifier de tels points, mais que ces dernières ne sont pas employées ici, car aucune irrégularité n'est observée au niveau des graphiques de résidus.

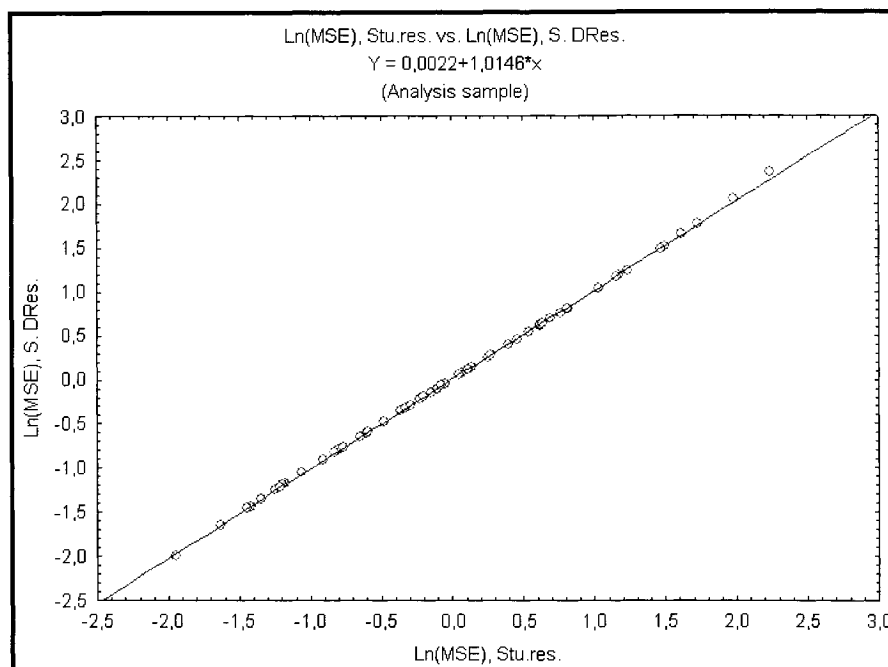


Figure 7.9 : Résidus studentisés en fonction des résidus studentisés supprimés

Toutes ces analyses permettent d'affirmer que le modèle considéré est valide et que les résultats obtenus sont valables. De ces résultats, il est possible de tirer la conclusion qui suit : quatre principales variables influencent le système soit la corrosion, le type de film l'écart au temps d'exposition et un effet matrice. Rappelons finalement que la corrosion est la variable la plus importante du modèle.

7.2.3 Analyse de variance à l'aide d'un modèle de régression

Il est possible d'utiliser les trois matrices réalisées afin de calculer une moyenne et une variance au niveau des MSE. L'étude de la variance a pour but de valider les essais précédents. En effet, si la variance varie en fonction des conditions, il devient difficile de se fier aux rapports « signal sur bruit » de la figure 7.4. Tel qu'effectué à la section précédente, cette analyse a été effectuée à l'aide de modèles mixtes (facteurs quantitatifs et qualitatifs).

Avant de réaliser l'analyse de variance, l'effet matrice doit être retiré des résultats. En effet, comme le calcul de la variance s'effectue en utilisant les résultats des trois matrices, il devient impossible d'inclure la variable matrice. Une équation de régression est donc produite et indique qu'il faut effectuer quelques ajustements aux MSE des matrices A et B (voir tableau 7.7). Notons que l'on ne tient pas ici compte des effets d'interactions. En effet, les résultats des logarithmes naturels des MSE de la matrice A doivent être augmentés de 0,190957 pour être au même niveau que ceux de la matrice C. Les résultats de la matrice B doivent être augmenté de 0,169306.

Tableau 7.7 : Modèle de régression mixte pour éliminer l'effet de la variance

Effect	Parameter Estimates							
	Sigma-restricted parameterization							
	Level of Effect	Column	Ln(MSE) Param.	Ln(MSE) Std.Err	Ln(MSE) t	Ln(MSE) p	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt
Intercept		1	0,981716	0,060119	16,3295	0,000000	0,860390	1,103041
P Source	1	2	-0,024172	0,028118	-0,8597	0,394858	-0,080917	0,032573
Type Film	1	3	-0,214362	0,039765	-5,3907	0,000003	-0,294612	-0,134113
Type Film	2	4	0,116616	0,039765	2,9326	0,005422	0,036367	0,196865
NC/C	1	5	-0,846303	0,039765	-21,2826	0,000000	-0,926552	-0,766054
NC/C	2	6	-0,035286	0,039765	-0,8874	0,379940	-0,115535	0,044963
Matrice	1	7	-0,190957	0,039765	-4,8021	0,000020	-0,271206	-0,110708
Matrice	2	8	-0,169306	0,039765	-4,2577	0,000114	-0,249555	-0,089057
Dx		9	-0,005581	0,006888	-0,8103	0,422325	-0,019481	0,008318
Dy		10	0,001640	0,006888	0,2381	0,812995	-0,012260	0,015539
Dz		11	0,002573	0,004509	0,5705	0,571353	-0,006527	0,011672
Dt		12	0,018056	0,004509	4,0044	0,000248	0,008956	0,027155

Les variances de ces MSE transformés sont calculées et analysées à l'aide d'un modèle de régression mixte. Les résultats de cette régression sont présentés au tableau 7.8. Ce dernier montre que la corrosion est toujours significative et influence la réponse (la variance des MSE) de manière importante.

Tableau 7.8 : Résultat de l'analyse de la variance

Effect	Univariate Results for Each DV				
	Sigma-restricted parameterization				
	Effective hypothesis decomposition				
	Degr. of Freedom	Ln(VAR) Sans effet matrice SS	Ln(VAR) Sans effet matrice MS	Ln(VAR) Sans effet matrice F	Ln(VAR) Sans effet matrice p
Intercept	1	2,5392	2,53917	0,571181	0,471455
P Source	1	6,0438	6,04380	1,359538	0,277200
Film	2	3,6432	1,82160	0,409764	0,676984
NC/C	2	77,3490	38,67449	8,699734	0,009842
Dx	1	4,4187	4,41868	0,993972	0,347970
Dy	1	0,0150	0,01498	0,003370	0,955134
Dz	1	0,5945	0,59454	0,133741	0,724066
Dt	1	0,0103	0,01031	0,002320	0,962763
Error	8	35,5638	4,44548		
Total	17	127,6383			

Toutefois, une analyses globale montre que la variance est stable (voir figure 7.10, graphique du bas). Le graphique du haut montre bien que une ou des variables produisent un effet non négligeable sur la réponse. Ces analyses valident les résultats du design d'expérience ainsi que celles du modèle de régression de la section 7.2.2.

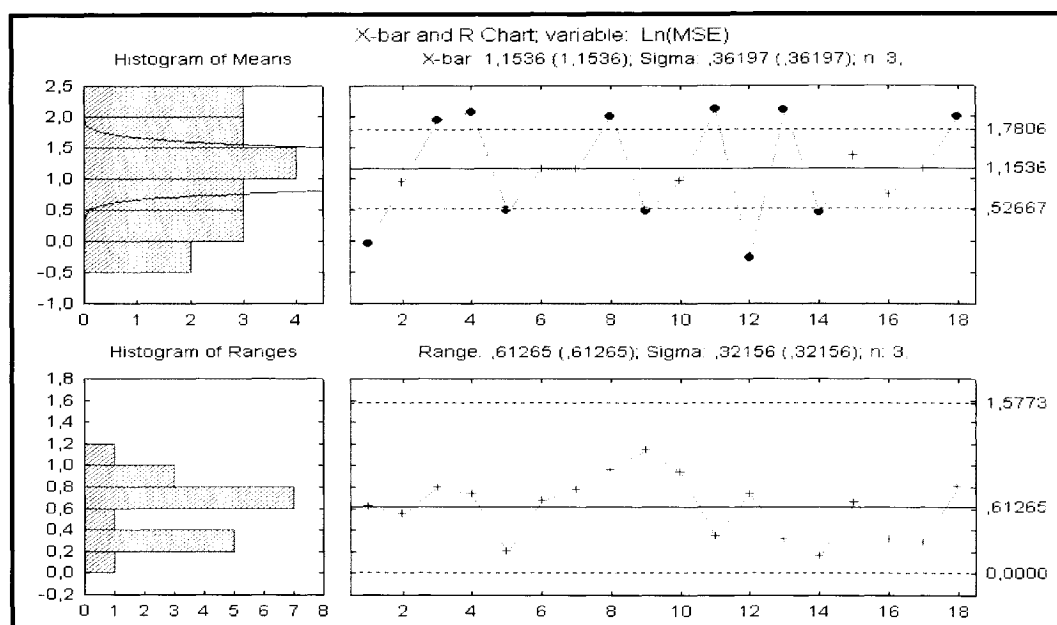


Figure 7.10 : Carte de contrôle des trois matrices

Il est donc possible d'affirmer que les résidus tirés de la modélisation des fonds d'images sont influencés par quatre principales variables. La corrosion est la plus importante d'entre elles et les variables de positionnement sont toutes peu influentes. Cependant, une partie non négligeable de la variabilité est expliquée par un effet matrice qui prend ses racines de différences entre la matrice C et les matrices A et B. Cette variable cache d'autres effets qui ne sont pas pris en compte dans ce design. La section 7.2.5 a donc pour but de découvrir ce qui se cache derrière cette variable. De plus, toutes les analyses réalisées à cette étape ne tiennent compte que de données centrées. La section qui suit va donc analyser des profils de résidus pris aux extrémités de conduites non corrodées, tel que spécifié à la section 7.1.4.

7.2.4 Analyse de l'effet de la position de prise de données

Comme les résultats précédents indiquent que la corrosion est la variable qui influence le plus les MSE, il est possible d'utiliser un autre type d'analyse statistique afin de vérifier si la position de prise de donnée influence les réponses. Une analyse ANOVA a donc été employée à cet effet. Celle-ci permet de vérifier l'effet de variables qualitatives, comme le type de film, sur les MSE. Comme les tuyaux analysés ne sont pas dégradés, la variable corrosion ne fait pas partie de l'analyse. Les variables considérées sont le type de film (Fuji 50, 80 et 100), la position de prise de mesure (centrée, gauche et droite, voir section 7.1.4) et la matrice d'analyse. L'écart au temps optimal est considéré comme ayant un effet négligeable. Les résultats de l'analyse ANOVA sont présentés au tableau 7.9 et à la figure 7.11. Le tableau 7.9 révèle tout d'abord que l'effet « position » n'est pas du tout significatif. Les analyses réalisées sur les radiographies devraient donc être valides peu importe la provenance des données. Comme variables importantes et significatives, on retrouve la matrice et le type de film. La figure 7.11 confirme ces résultats et montre que l'effet matrice est surtout important pour les film de type Fuji 50 (pour des analyses de tuyaux non corrodés).

Tableau 7.9 : Analyse ANOVA de l'effet position

GENERAL Effect	Univariate Results for Each DV Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	Degr. of Freedom	Ln(MSE) SS	Ln(MSE) MS	Ln(MSE) F	Ln(MSE) p
Intercept	1	3,432014	3,432014	62,45015	0,000000
Matrice	2	2,392216	1,196108	21,76481	0,000002
Position	2	0,160597	0,080298	1,46114	0,249737
Type de film	2	4,503769	2,251884	40,97608	0,000000
Matrice*Position	4	0,099491	0,024873	0,45260	0,769616
Matrice*Type de film	4	0,554562	0,138641	2,52275	0,064249
Position*Type de film	4	0,095993	0,023998	0,43668	0,780925
Matrice*Position*Type de film	8	0,112426	0,014053	0,25572	0,974859
Error	27	1,483814	0,054956		
Total	53	9,402869			

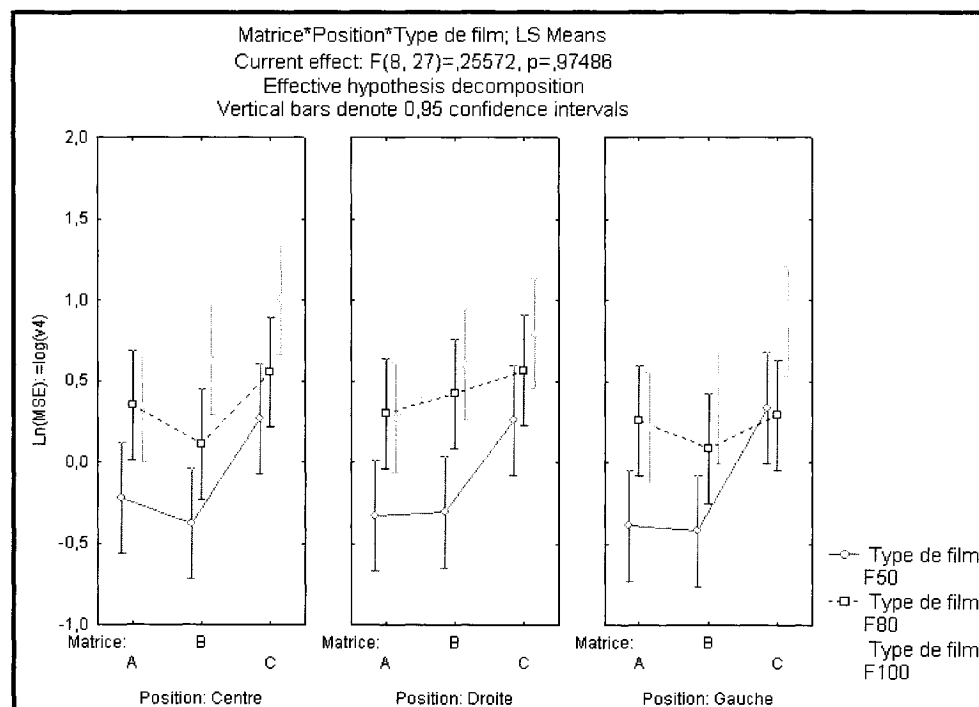


Figure 7.11 : Résultats graphiques de l'analyse ANOVA sur l'effet position

L'analyse ANOVA réalisée à cette section montre que la position de prise de mesure au niveau de fonds de radiographies n'influence pas les MSE. Toutefois, cette

analyse n'est valide que pour des tuyaux d'une longueur de 10 pouces. Il serait donc utile de vérifier la longueur maximale de film permettant d'éviter l'influence d'une telle variable. Il est aussi possible de remarquer l'influence de l'effet matrice, toujours présent même au niveau de radiographies non corrodées. Vu son importance, cet effet risque de rendre la méthode d'analyse de fonds imprécise et de fournir un mauvais classement des modes de corrosion. Un tel classement engendre directement un calcul faussé de l'indice de sévérité, ce qui n'est pas du tout souhaitable. Les deux sections qui suivent étudient donc plus en profondeur les effets d'une telle variable sur les MSE ainsi que la provenance de celle-ci. Notons finalement qu'une analyse de résidus réalisés sur le modèle ANOVA présenté ne montre aucune tendance particulière. Les conclusions présentées plus haut sont donc toutes valides.

7.2.5 Analyse de l'effet matrice

Tel que mentionné précédemment, cette section a pour but d'analyser l'effet matrice sur les résultats de MSE. En premier lieu, les variables films et corrosion ont été recombinaées et recodées en une seule variable ici nommée « film codé ». Ce codage comporte des chiffres de 1 à 9 représentant à la fois le type de film et la corrosion. Les chiffres 1, 2 et 3 sont utilisés pour la corrosion localisée et les films Fuji 50, Fuji 80 et Fuji 100 respectivement. Il en va de même pour la corrosion généralisée, qui est représentée par les chiffres 4, 5 et 6 et les tuyaux non corrodées qui sont codées par les chiffres 7, 8 et 9. Ce changement de variable permet de produire une analyse ANOVA sur tous les résultats. Tel que mentionné précédemment, l'effet d'écart au temps d'analyse est considéré comme négligeable et il est inclus dans l'erreur. Les graphiques (voir figure 7.12) de cette analyse ANOVA sont très clairs, l'effet matrice est non négligeable et entraîne parfois un chevauchement des MSE provenant de divers mécanismes de corrosion. Dans le cas montré par le rectangle à la figure 7.12, des fonds non corrodés fournissent des résultats similaires à des tuyaux présentant de la corrosion généralisée. La variable matrice est donc la source d'imprécisions importantes qui engendrent un mauvais classement des mécanismes de corrosion.

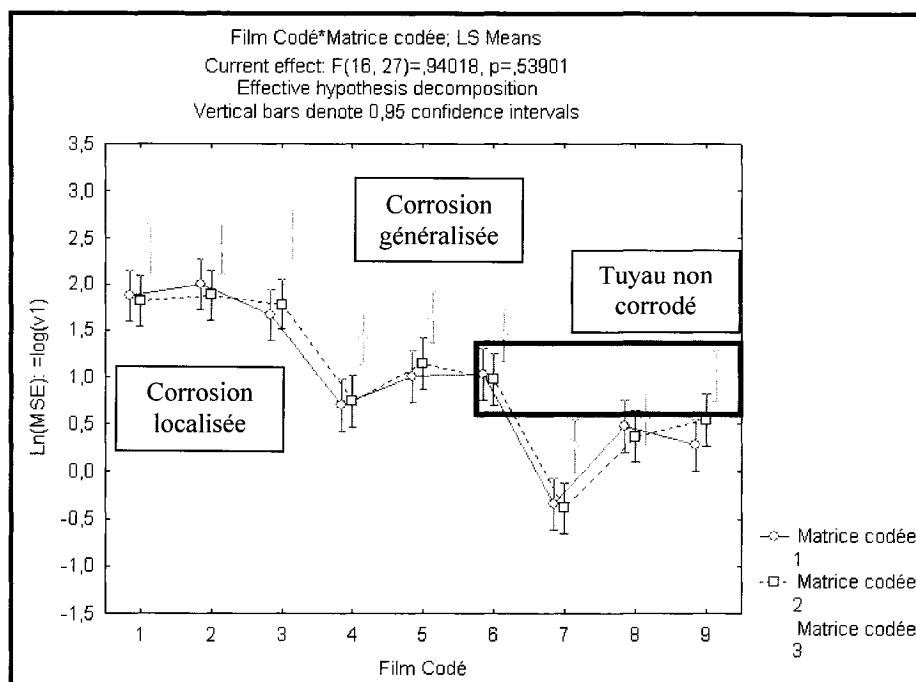


Figure 7.12 : Résultats graphiques de l'analyse Anova

Le tableau d'analyse de variance du modèle ANOVA (voir tableau 7.10) confirme bien les observations précédentes. Ce dernier montre tout d'abord que les effets combinés du film et de la corrosion expliquent environ 85% de la variabilité des MSE. Cette observation est compatible avec les conclusions des sections 7.2.1 et 7.2.2. Cependant, en ajoutant l'effet matrice, on explique environ 96% de la variabilité observée au niveau des MSE! Comme cet effet est non négligeable et engendre des imprécisions importantes, sa provenance se doit d'être déterminée. Notons finalement qu'une analyse de résidus a été effectuée et qu'aucune tendance particulière n'a été observée. Les résultats présentés à cette section sont donc valides.

Tableau 7.10 : Analyse de variance du modèle Anova

GENERAL Effect	Univariate Results for Each DV Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	Degr. of Freedom	Ln(MSE) SS	Ln(MSE) MS	Ln(MSE) F	Ln(MSE) p
Intercept	1	71,86503	71,86503	2020,509	0,000000
Film Codé	8	29,20631	3,65079	102,643	0,000000
Matrice codée	2	3,50853	1,75426	49,322	0,000000
Film Codé*Matrice codée	16	0,53504	0,03344	0,940	0,539010
Error	27	0,96033	0,03557		
Total	53	34,21021			

7.2.6 Analyse de la provenance de l'effet matrice

Tel qu'observé à la section précédente, l'effet matrice explique une grande partie de la variabilité présente au niveau des données de fonds d'images. Cette variable est aussi la source d'imprécisions importantes qui vont engendrer un mauvais calcul de l'indice de sévérité de corrosion par des classements erronés des mécanismes de dégradation. Comme les essais se sont déroulés pendant plusieurs jours et que certains paramètres ont variés lors de ces derniers (voir section 7.1.2), l'effet matrice peut provenir de plusieurs sources. Cependant, une possibilité semble plus plausible, il s'agit d'un effet d'opérateur. Plus particulièrement, le problème prendrait sa source dans un outil employé par les techniciens en radiographie. Tel que mentionné à la section 2.3.2, les techniciens utilisent une règlette de calcul afin d'évaluer les temps de radiographie. Chacun d'entre eux possède sa propre règlette. Si les temps évalués d'un opérateur à un autre varient, le degré de noircissement global des radiographies va aussi varier. En somme, il est possible que ces différences soient dues au degré de noircissement des radiographies et qu'elles proviennent des calculs de temps réalisés par les opérateurs. L'analyse de ce phénomène est effectuée en deux étapes. Tout d'abord, l'étude de la luminance maximale est étudiée sur chaque radiographie. Si les luminances (niveau de gris de 0 à 255) provenant de certaines matrices d'essais sont significativement moins

grandes, il sera possible de conclure que les radiographies provenant de ces matrices sont plus sombres. Par la suite, les temps de radiographie des trois matrices seront étudiés à l'aide d'un modèle ANOVA.

Suite à une observation qualitative des films, il est possible de s'apercevoir que les radiographies appartenant à la matrice C semblent effectivement plus foncées. La figure 7.13 illustre un cas où deux expériences équivalentes ont généré deux résultats différents. En effet, le fond et les parois du tuyau radiographié de l'essai#7 de la matrice C sont plus foncés que ceux de l'image provenant de la matrice A. Des analyses plus poussées doivent être effectuées afin de s'assurer que cette observation s'applique à toutes les autres radiographies. En premier lieu, il faut vérifier si cette différence de luminance, ou de densité, est significative. Si elle l'est, il faut ensuite étudier le phénomène qui engendre une image plus foncée et surtout si ce phénomène a une influence sur les MSE.

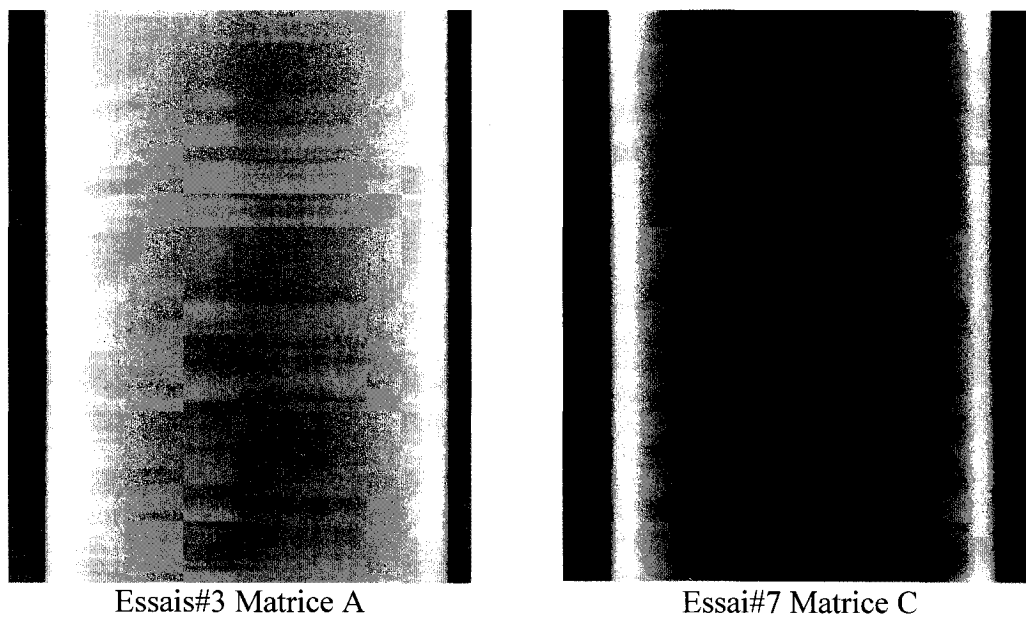


Figure 7.13 : Comparaison entre des images équivalentes des matrices A et C

Afin de s'assurer qu'il y a une différence importante et significative au niveau de la luminance des images, la luminance maximale de chaque essai a été mesurée. Les points considérés se trouvent donc tous au niveau des parois et correspondent au maximum d'épaisseur traversée. Plus la luminance de ce point est grande et plus l'image peut être considérée comme claire. En revanche, plus ce point est sombre et plus le reste de l'image va être foncée. Un premier graphique (voir figure 7.14) a donc été créé à partir des résultats de luminance moyens affichés à l'annexe 9. Celui-ci montre bien que les luminances provenant de la matrice C sont plus faibles. En fait, si on ignore les données extrêmes de la matrice A et B, il est possible de voir que les luminances les plus fortes de la matrice C correspondent presque aux données les plus faibles des deux autres matrices.

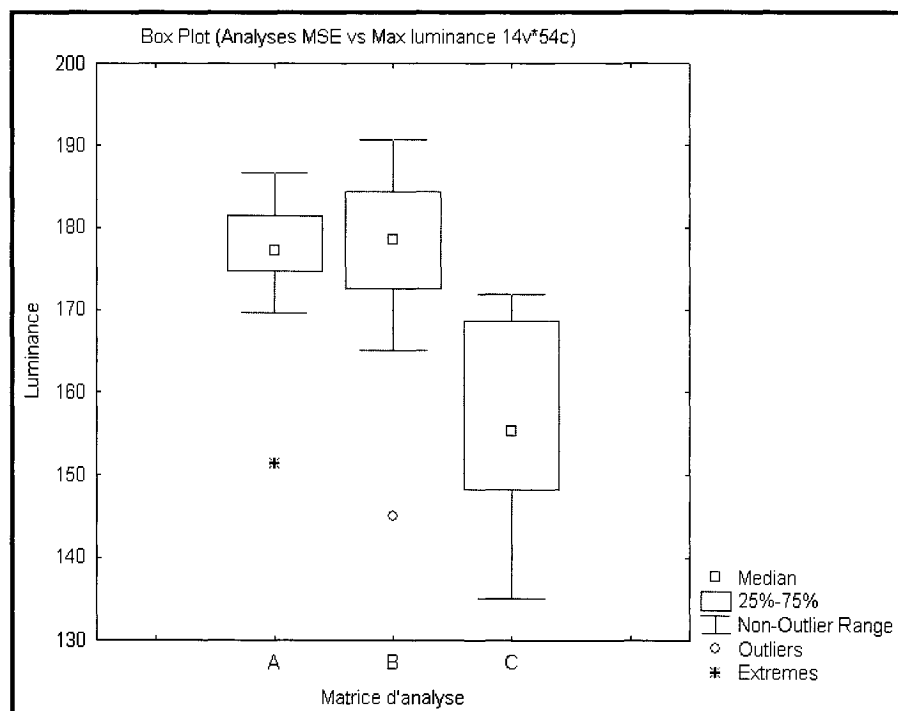


Figure 7.14 : Diagramme de Tukey des données de luminances

Afin de vérifier si cet effet est important et significatif, un modèle ANOVA est appliqué sur les données et les résultats de celui-ci sont fournis à la figure 7.15 et au

tableau 7.11. Ceux-ci sont bien clairs, les radiographies de la matrice C sont plus sombres que celles qui proviennent de la matrice A et B. Ce phénomène est particulièrement important au niveau des films Fuji 50. Le tableau 7.11 montre aussi que l'effet matrice est significatif et important. Une analyse de résidus valide ces résultats.

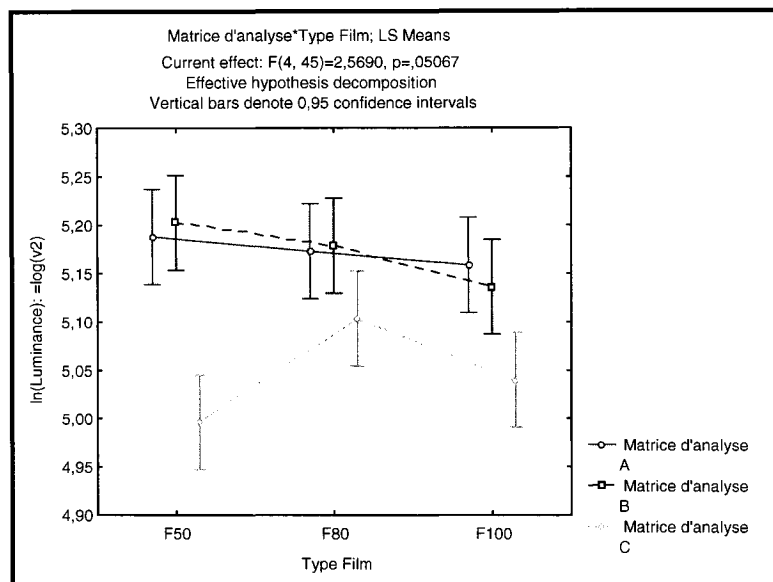


Figure 7.15 : Résultats graphiques de l'analyse Anova sur les luminances

Tableau 7.11 : Analyse de variance du modèle Anova des luminances

GENERAL Effect	Univariate Results for Each DV Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	Degr. of Freedom	ln(Luminance) SS	ln(Luminance) MS	ln(Luminance) F	ln(Luminance) p
Intercept	1	1421,614	1421,614	399225,1	0,000000
Matrice d'analyse	2	0,191	0,096	26,8	0,000000
Type Film	2	0,015	0,007	2,0	0,141301
Matrice d'analyse*Type Film	4	0,037	0,009	2,6	0,050672
Error	45	0,160	0,004		
Total	53	0,403			

Les essais précédemment réalisés ont montré que les radiographies de la matrice C sont significativement plus sombres que celles provenant des deux autres matrices. Il reste maintenant deux points à éclaircir. En premier lieu, il faut vérifier si des

radiographies plus sombres engendrent une augmentation des résidus moyens. La provenance de telles radiographies est finalement étudiée.

Le problème réside maintenant dans la compréhension de la variation des MSE. Il est difficile d'expliquer, à l'aide des données et des moyens employés dans le cadre de ce projet, la raison exacte de l'augmentation des MSE lorsque ceux-ci proviennent d'une image plus sombre. Cependant, il est fort possible que ce problème soit uniquement relié au modèle de type polynomial. Plusieurs observations montrent en effet que les variations au niveau des MSE semblent dépendantes de la densité ou encore de la clarté des objets sur le film. La figure 7.16, qui représente les courbes de deux radiographies du même tuyau, montre bien la différence entre une courbe issue d'une image plus sombre par rapport à celle provenant d'une image claire. Il est possible de noter la présence d'un long plateau (entouré en rouge) au niveau des données provenant de la matrice C (courbe en bleu). Ce plateau est engendré par l'incapacité du film à représenter des densités supérieures à un certain seuil (voir section 6.2.3). De tels plateaux sont très difficilement modélisables à l'aide de modèles polynomiaux. Ils engendrent sans aucun doute une augmentation des résidus.

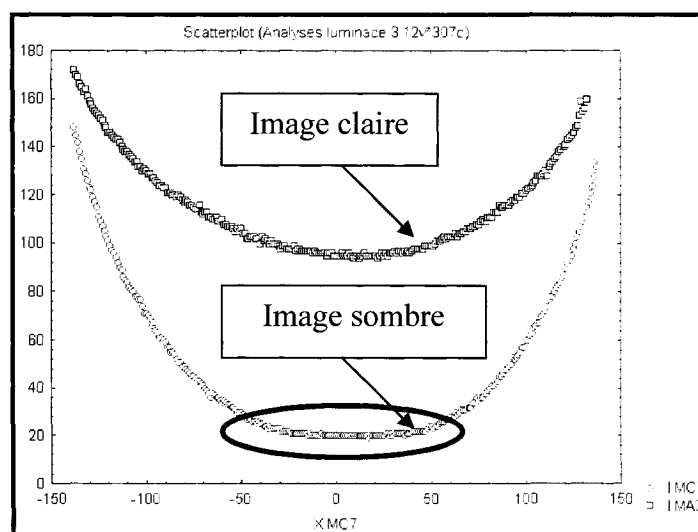


Figure 7.16 : Différences entre les courbes des matrice C et A

La figure 7.17 montre bien que des images plus sombres génèrent des résidus plus dispersés. Le fond d'image, ainsi que les zones adjacentes aux parois sont moins bien modélisés. L'hypothèse initialement proposée, qui veut que l'arrangement des résidus soit similaire peu importe les conditions, est donc réfutée. En effet, la figure 7.17 montre que deux radiographies d'une même conduite génère des profils de résidus différents. Les modèles d'analyses de fonds devront donc être améliorés.

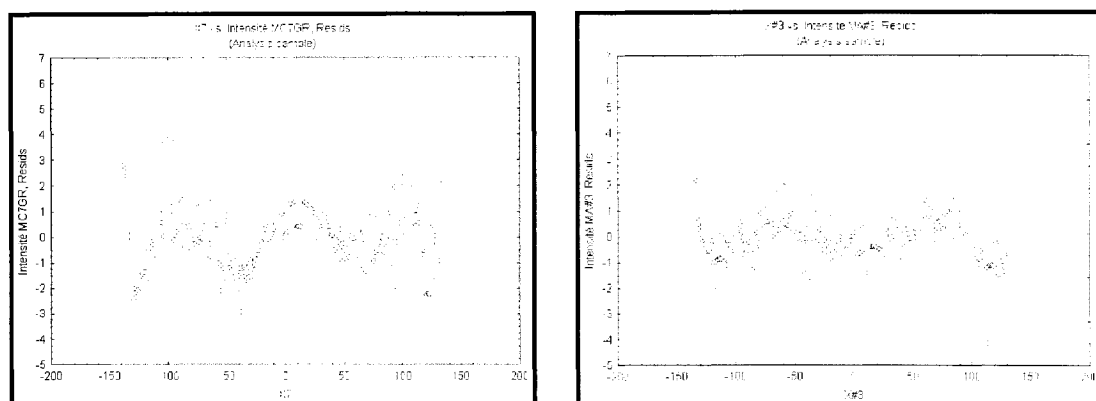


Figure 7.17 : Différences au niveau des résidus de MC7 et MA3

Les analyses précédentes ont démontré qu'il existe des différences entre des résidus provenant de radiographies sombres et claires, il reste maintenant à identifier le phénomène à la base de l'obtention de densités radiographiques différentes. Le calcul du temps d'exposition par les techniciens a été mis en cause au début de cette section. Cependant, l'application d'un modèle ANOVA sur tout les temps calculés lors des essais contredit cette hypothèse. En effet, le tableau de l'analyse de la variance (voir tableau 7.12), ainsi que la figure 7.18, montrent qu'il n'y a que l'effet du film qui génère des différences significatives et importantes sur le temps de radiographie. L'erreur est aussi presque importante que l'effet du film. Il y a donc une autre variable, ou un groupe de variables, qui ont des influences sur la densité radiographique.

Tableau 7.12 : Tableau d'analyse de la variance du temps de radiographie

GENERAL Effect	Univariate Results for Each DV (Analyses temps radio (source Max))				
	Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	Degr. of Freedom	ln(Temps optimal en secondes) SS	ln(Temps optimal) MS	ln(Temps optimal) F	ln(Temps optimal) p
Intercept	1	753,8646	753,8646	3312,366	0,000000
Matrice	2	0,6649	0,3325	1,461	0,258281
Type de film	2	5,5925	2,7962	12,286	0,000432
Matrice*Type de film	4	0,1914	0,0479	0,210	0,929343
Error	18	4,0966	0,2276		
Total	26	10,5455			

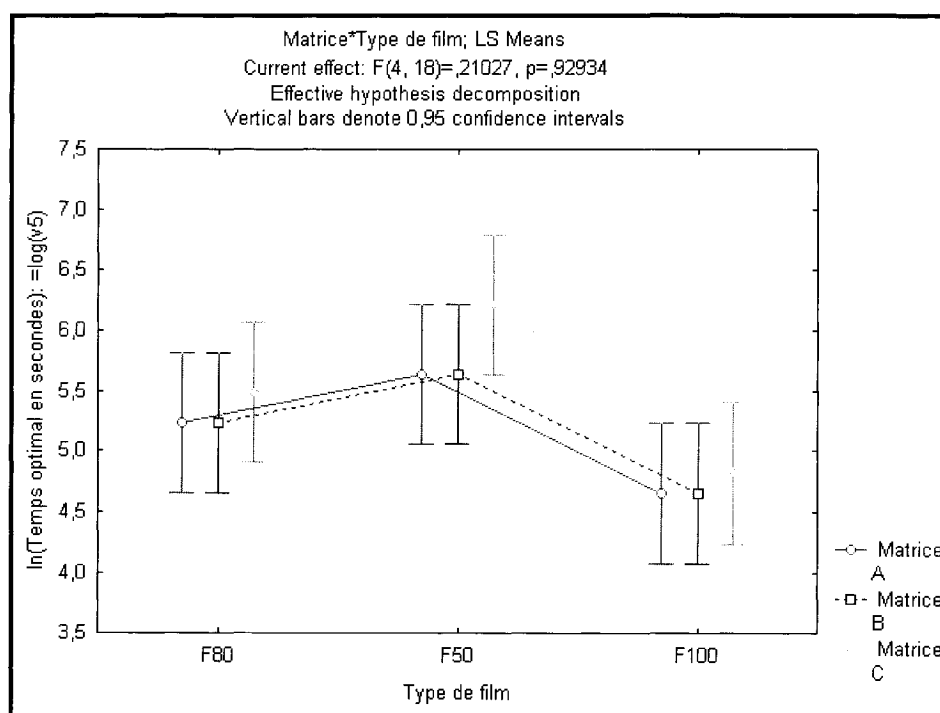


Figure 7.18 : Résultats graphiques de l'analyse Anova sur les luminances

7.2.7 Autres effets de noircissement et amélioration du modèle

L'analyse précédemment effectuée prouve que le calcul du temps de radiographie n'est pas la cause de l'obtention de clichés plus sombres. Il est donc probable que cet effet de noircissement provienne des films, du processus de développement, des convertisseurs de plombs, etc. D'autres travaux sont à considérer

afin d'identifier la source de ce phénomène soit pour le prévenir ou pour développer des mécanismes de contrôle.

Il existe un autre problème qui est relié à la variation de tons de gris, ou de luminance. Ce dernier réside dans la caractérisation de l'importance des défauts. En effet, une image qui est globalement plus foncée fait ressortir les défauts de manière plus importante. Ce phénomène est bien illustré par la figure 7.19, qui montre les résidus provenant d'essais de la matrice A par rapport à ceux provenant de la matrice C. Les résidus les plus faibles appartenant à l'essai MC15 se situent tous autour de 10 alors que ceux de la matrice A sont plus près de 8. Rappelons ici que ces deux résultats font référence au même type de défauts soit des piqûres de corrosion simulées dont la profondeur est la même dans les deux cas. Si on fixe « 8 » comme référence (qui a une profondeur de 6,35 mm ou 0,25 pouce) alors 10 impliquerait un défaut 25% plus important (ou un défaut ayant une profondeur de 7,938 mm ou de 0,3125 pouce). Ce type d'imprécision pourrait être la source de conséquences assez fâcheuses. De plus, il est possible de voir à la figure 7.19 que les zones près des parois (entourées en rouge) ainsi que les zones entre -50 et -100 (par symétrie, entre 50 et 100) sont moins bien modélisées sur des radiographies plus sombres (graphique MC#15 par rapport à MA#17). En effet, ces résidus, pour la matrice A se situent pour la plupart entre -2 et 2 alors que ceux de la matrice C oscillent entre 6 et -4. Ces zones présentent effectivement une variation plus importante au niveau de leurs résidus. Ce phénomène engendre une augmentation des MSE malgré l'absence de défauts.

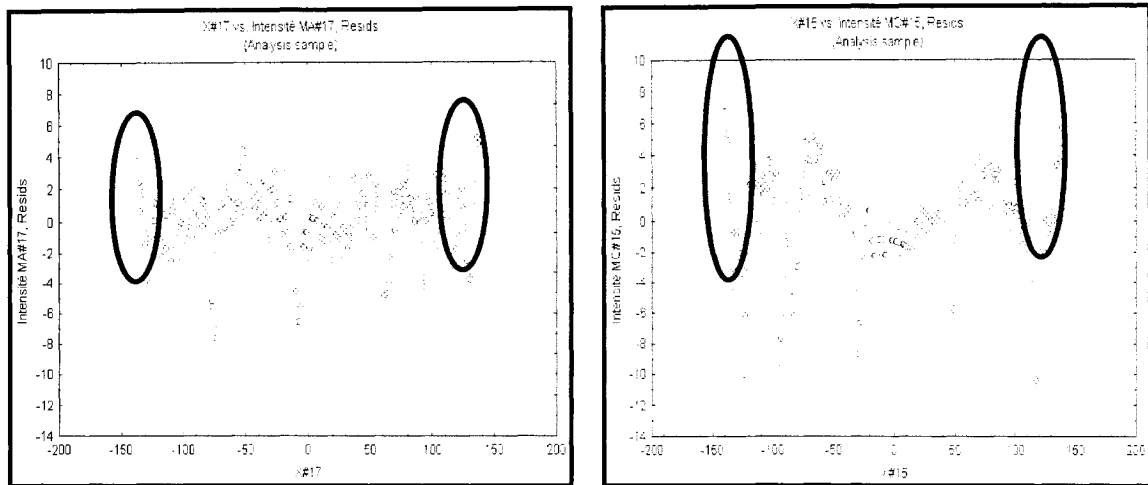


Figure 7.19 : Résidus de deux structures présentant de la corrosion localisée

Il existe heureusement des possibilités permettant de réduire ces imprécisions. Premièrement, l'ajustement de modèles plus précis pourrait pallier le problème. Si les fonds radiographiques sont parfaitement modélisés, il est probable que les variations au niveau des tons de gris de défauts semblables soient diminuées. Il est aussi possible de considérer d'autres méthodes de corrections basées sur les maximums de luminance. D'autres travaux doivent donc être réalisés afin d'améliorer les premiers modèles de fonds d'images proposés dans ce travail. Cependant, les premiers résultats montrés ici sont très prometteurs, car les modélisations de fonds employées pourraient non seulement servir à identifier des mécanismes de corrosion, mais aussi à l'évaluation d'épaisseurs résiduelles de parois.

Malgré les diverses erreurs engendrées par l'utilisation des résidus des modèles polynomiaux d'ordre 4, ces derniers demeurent utilisables dans le cadre d'analyses de conduites radiographiées. En effet, il est possible d'améliorer leur efficacité en réutilisant les résidus afin d'obtenir un second modèle beaucoup plus précis. Pour ce faire, deux étapes pourraient être considérées. Premièrement, il serait possible d'éliminer tous les points s'écartant de manière significative des autres. Par exemple, un graphe de résidus normalisé pourrait être utilisé et tous les points sortant de l'intervalle compris entre -2.5 et 2.5 pourraient être éliminés. Il serait aussi possible d'utiliser un profil de

résidus propre, d'identifier des valeurs minimales et maximales acceptables sur ce dernier et de comparer le profil propre avec le profil corrodé. Cette comparaison permettrait l'élimination des données provenant de zones dégradées.

En second lieu, il serait possible de tracer le contour du profil de résidus à l'aide de techniques de krigeage. Une fois ce contour obtenu, on pourrait obtenir les points situés au centre de ce profil (entre les courbes supérieures et inférieures) et de relier ces résidus à leurs luminances originales. Ces nouveaux points pourraient servir à générer une courbe non bruitée et modélisable à l'aide de splines. Celle-ci pourrait être utilisée plus efficacement afin de caractériser les défauts. La figure 7.20 illustre bien la première phase d'élimination reliée à un tuyau présentant un faible degré de corrosion généralisée. La figure 7.21 représente quant à elle l'application de splines linéaires à des données provenant de fonds théoriques. Ce graphique montre l'évolution de l'épaisseur traversée (en pouces) en fonction de la position axiale dans le tuyau (en pouces). La technique de modélisation par splines linéaires laisse, dans ce cas simulé, des résidus de 0 pour tous les points observés. Ceci est dû au fait que la courbe modélise parfaitement les données observées. Une telle courbe, appliquée à un fond réel, devrait donc générer un arrangement de résidus beaucoup plus facile à interpréter. Une fois un tel arrangement obtenu, il devient possible d'exécuter une analyse précise des données de fonds d'images.

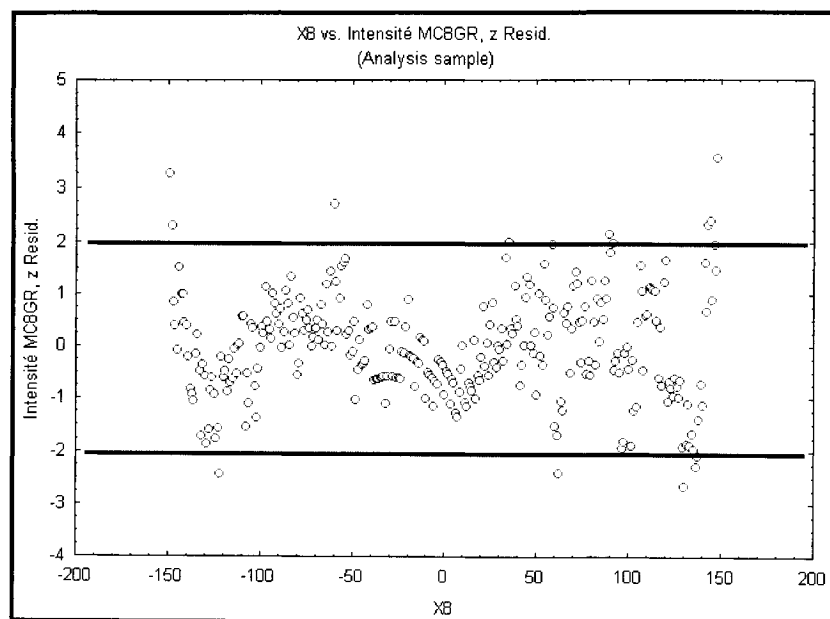


Figure 7.20 : Identification et élimination des défauts

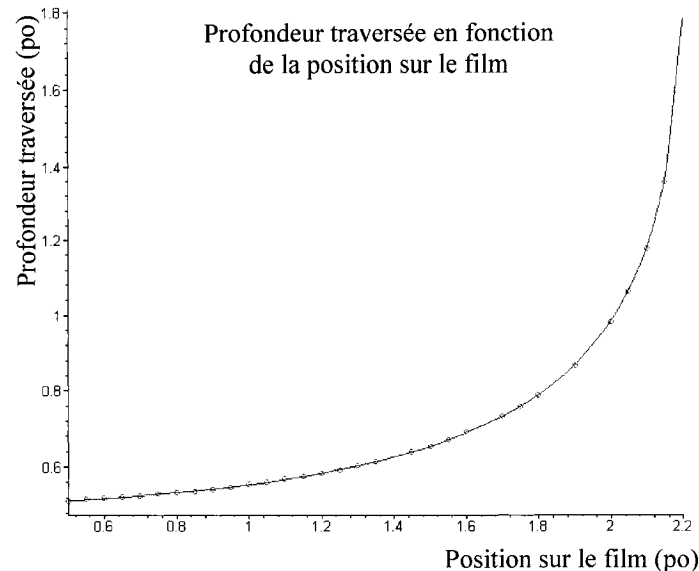


Figure 7.21 : Utilisation de splines linéaires

7.3 Retour sur les résultats et recommandations

Les essais qui ont été réalisés dans le cadre de ce mémoire ont générés des résultats fort intéressants. En premier lieu, ils ont démontré que la technique d'étude de fonds d'images radiographiques par le biais des résidus peut s'avérer très efficace. En effet, cette méthode élimine les influences de plusieurs variables difficilement contrôlables tels que le positionnement et la puissance des sources. Elle permet aussi de dégager les défauts du phénomène de noircissement (des bords vers les fonds) d'images due à la variation de l'épaisseur traversée par les rayons gamma. Cette technique d'étude de fonds d'images peut donc s'avérer très intéressante afin d'effectuer la classement de mécanismes de corrosion dans le but d'obtenir des indices de sévérité.

Cependant, au moins une autre variable, plus difficilement contrôlable, influence les MSE par la variation de la densité globale des films. Cette variable est possiblement reliée au processus de développement des films ou aux films eux-mêmes. Cette

influence est assez importante pour engendrer des erreurs de classification de mécanismes. De telles erreurs fausseraient sans aucun doute le calcul de sévérité de la corrosion. D'autres essais sont à prévoir afin d'identifier cette variable, ou ce groupe de variables, qui influencent la densité globale des films. D'autres radiographies sont aussi analysées à la section 7.4 afin de bien illustrer l'effet des erreurs de modélisations et de l'utilisation de résultats d'analyse de fonds dans le calcul de l'indice de sévérité.

Afin de mieux visualiser ce qui a été réalisé dans le présent travail, les points qui suivent présentent un résumé des travaux de recherche accomplis ainsi que la suggestion de développements futurs.

- L'utilisation des résidus de modèles polynomiaux d'ordre 4 appliqués à des fonds d'images radiographiées conserve l'influence de deux principales variables soit : la corrosion et le type de film. L'écart au temps d'analyse optimal reste influent, mais peu important. La corrosion et le type de film expliquent environ 82% de la variabilité des données de fonds d'images. Un bon respect du temps d'analyse ferait grimper ce chiffre à 84%.
- La conservation du même type de film tout au long des analyses est recommandée. En effet, changer de type lors du suivi d'une structure diminue la précision des analyses et pourrait générer des erreurs de classement. L'utilisation de film de type Fuji 80 est aussi à considérer, car celui-ci représente un bon compromis en terme de sensibilité et de vitesse d'exposition par rapport aux Fuji 50 et Fuji 100.
- Les effets de positionnement et de puissance de source, qui constituent un important générateur de bruit non désiré, sont éliminés. Les modèles basés sur les résidus permettent donc d'utiliser les techniques de radiographie classiques, contrairement à plusieurs protocoles d'analyse présentement en développement. En d'autres termes,

aucune procédure particulière ne doit être appliquée à la radiographie de conduites afin d'obtenir de résultats valides.

- Cependant, une fraction importante de la variabilité, soit 10%, reste à expliquer (effet matrice). Tel qu'observé à la figure 7.12, les phénomènes causant cette variabilité non expliquée engendrent des imprécisions qui rendent difficilement possible le discernement de mécanismes de corrosion à partir des MSE. L'effet de ces imprécisions risque aussi de se transposer sur toutes autres caractéristiques mesurables au niveau des résidus.
- En plus de conserver le même type de film et de respecter le temps optimal d'analyse, un deuxième moyen d'améliorer la précision de la méthode consiste en l'utilisation de modèles plus précis que les équations polynomiales. Ces derniers éviteraient sans aucun doute l'augmentation des MSE due à une mauvaise modélisation des radiographies plus sombres. Ils représenteraient aussi très fidèlement les données de fonds d'images et généreraient des structures de résidus beaucoup plus régulières.
- Il reste une autre source d'imprécision à considérer. Il s'agit de l'augmentation des résidus provenant de défauts semblables causée par un noircissement plus important des images. Selon la figure 7.19, les défauts les plus exposés donnent des résidus qui sont 25% plus importants que ceux qui ont subi une exposition moindre. Cet écart doit être corrigé à l'aide de modèles appropriés des résidus en fonction de la densité radiographique. L'application de telles corrections pourrait permettre d'augmenter la variabilité expliquée par les modèles ainsi que de fournir des mesures précises de parois résiduelles à partir des fonds d'images.
- Il serait aussi nécessaire d'identifier la variable, ou le groupe de variables, influençant la densité des radiographies et, si possible, de les contrôler.

- En bref, l'amélioration des modèles par la réutilisation des résidus (tel qu'effectué à la section 7.2.7) est à considérer. En effet, une modélisation plus adéquate des fonds d'images permet d'éliminer une grande partie de l'erreur qui est simplement dû au manque d'ajustement des modèles polynomiaux. De plus, il est possible que l'amélioration des modèles de fonds d'images rende les techniques d'analyses par MSE moins sensibles aux variations de densités.

Finalement, le schéma d'une méthodologie de classification idéale est toutefois présenté à l'Annexe 10 de ce document. Ce dernier montre que, pour une conduite non corrodé, les résidus normalisés devraient rester compris entre 2.5 et -2.5. Pour ce qui est de la corrosion généralisée, les zones corrodées dépasseraient ces bornes et ce, de manière relativement uniforme sur toute la longueur de la radiographie. Finalement, la présence de corrosion localisée génèrerait des écarts locaux aux bornes susmentionnées. C'est donc sur l'étude des patrons de résidus et de résidus normalisés, en plus de l'analyse des moyennes des sommes de carrés des résidus, que pourrait se baser la détermination de l'indice de sévérité.

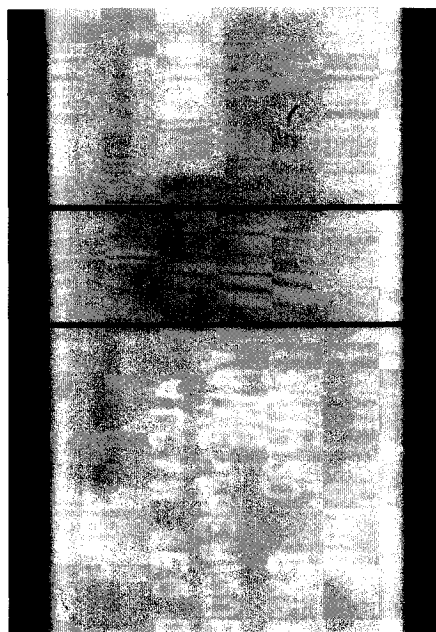
7.4 Exemples d'applications

Cette section touche l'application des modèles de fonds d'images polynomiaux à diverses conduites radiographiées afin d'illustrer le comportement de ces derniers vis-à-vis de cas réels ainsi que de fournir quelques exemples concernant les caractéristiques des résidus à mesurer. Cette section permet aussi d'orienter les travaux à venir en ce qui a trait à l'analyse de fonds d'images. Quatre cas sont ici considérés. Premièrement, deux tuyaux industriels, provenant de structures radiographiées d'Alcan, sont analysés. Ensuite, un tuyau, dont le diamètre externe est plus faible et la paroi est plus épaisse (que les conduites analysées tout au long de ce travail) est étudié. Finalement, une

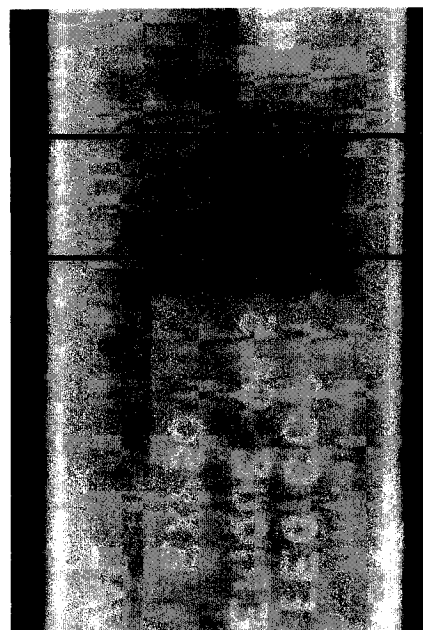
dernière analyse est exécutée sur un tuyau dont une moitié a subi une forte « attaque » par abrasion mécanique et l'autre est demeurée intacte. Les radiographies de ces quatre conduites ainsi que leurs analyses sont présentées aux sections qui suivent.

7.4.1 Cas des conduites industrielles

Les deux conduites provenant d'inspection de systèmes de valve d'Alcan présentent plusieurs caractéristiques qui s'écartent des conditions employées en laboratoire (voir figure 7.22). Premièrement, les conduites présentent des parois plus minces et des diamètres plus petits que les tuyaux d'acier inoxydables précédemment employés. En second lieu, il y a présence de nombreuses indications au niveau des fonds d'images. Certaines pratiques classiques en radiographies devront donc être légèrement altérée afin d'éviter de perdre trop d'informations, car les indications des techniciens laissées sur les films ne laissent presque pas de zones analysables au niveau des fonds de radiographies. Les rectangles rouges de la figure 7.22 marquent les zones qui ont été analysées sur les deux radiographies. Les résultats de ces analyses se retrouvent à la figure 7.23.



Valve#1



Valve#2

Figure 7.22 : Conduites corrodées d'Alcan

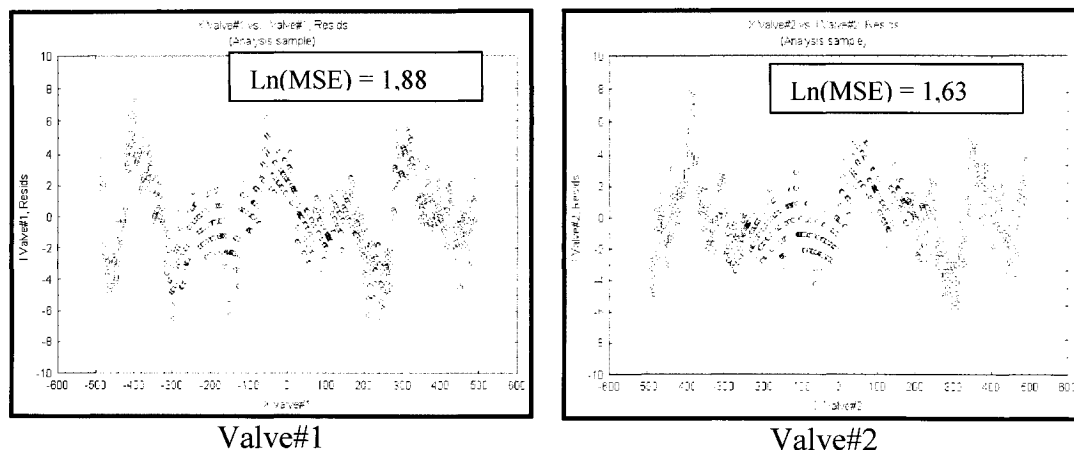


Figure 7.23 : Graphiques de résidus en fonction de la position

La figure précédente montre tout d'abord que les logarithmes naturels des MSE sont semblables et près de 2,0 pour les deux radiographies. Cette observation reflète bien la présence de corrosion généralisée au niveau des fonds d'images. De plus, les réponses fournies (logarithme des MSE) correspondent bien à ce qui a été obtenu en laboratoire. En effet, les logarithmes de MSE de corrosion généralisée se trouvaient toujours entre 0,50 et 2,00, ce qui est le cas des résultats obtenus ici. L'analyse de fonds d'image peut donc conduire à une bonne classification des radiographies en fonction des mécanismes de corrosion observés. Une telle classification va ensuite amener le calcul d'un indice de sévérité approprié. De plus, les graphiques de résidus montrent de fortes oscillations globales et aucun écart local. Ce type de profil correspond bien à de la corrosion généralisée. Cependant, tel que mentionné précédemment, les modèles à ajuster devront être raffinés. Il reste que la méthode employée est applicable à des cas industriels et que des tuyaux présentant de la corrosion sont bien classés, même à partir de profils de résidus imparfaits. L'analyse de fonds d'images possède donc une grande utilité dans l'évaluation de l'indice de sévérité et dans les opérations de classement des radiographies.

7.4.2 Analyse d'une conduite à forte paroi

Le travail de recherche entrepris ne concernait que des conduites dont le diamètre et l'épaisseur des parois étaient constants. Il est donc intéressant d'observer le comportement des résidus provenant d'une conduite dont les parois sont plus épaisses et dont le diamètre est plus faible que celles précédemment analysées. La radiographie d'une telle conduite est présentée à la figure 7.24.



Figure 7.24 : Radiographie d'une conduite à forte paroi et de faible diamètre

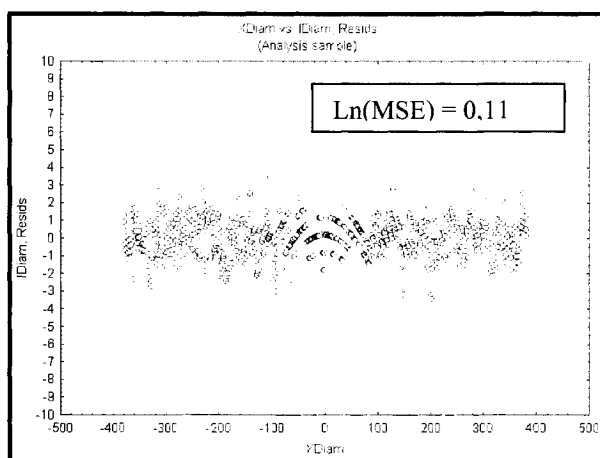


Figure 7.25 : Résidus d'une conduite à forte paroi et faible diamètre

Les résultats en terme de résidus et de résidus moyens sont très surprenants. Premièrement, il n'y a pas présence de zones instables aux bords, qui correspondent aux zones adjacentes aux parois (voir figure 7.25). De plus, la distribution des résidus est beaucoup plus stable. Ceci est fort probablement causé par une diminution plus rapide de la luminance des pixels et qui favorise une meilleure modélisation des données par un polynôme de degré 4. Le logarithme naturel du MSE est aussi très bas et correspond bien à un cas non corrodé. Cette analyse montre bien le potentiel et l'utilité d'améliorer les modèles de fonds d'images. En effet, les modèles actuels risquent d'être dépendants du diamètre des conduites et de l'épaisseur des parois. Ceci aura pour effet de faire varier l'indice de sévérité en fonction des paramètres des conduites à analyser. Si une meilleure modélisation reste légèrement dépendante des paramètres de conduites, un système de pondération est à prévoir.

7.4.3 Cas de corrosion localisée

L'étude d'un cas de corrosion localisée par abrasion est aussi fort intéressante à réaliser. En effet, le défaut produit mécaniquement pour générer la radiographie de la figure 7.26 est situé en bordure d'une paroi (celle de droite). Sa présence peut donc influencer le modèle global. Il est aussi possible que le défaut se perde dans du bruit. La zone analysée est entourée en rouge.

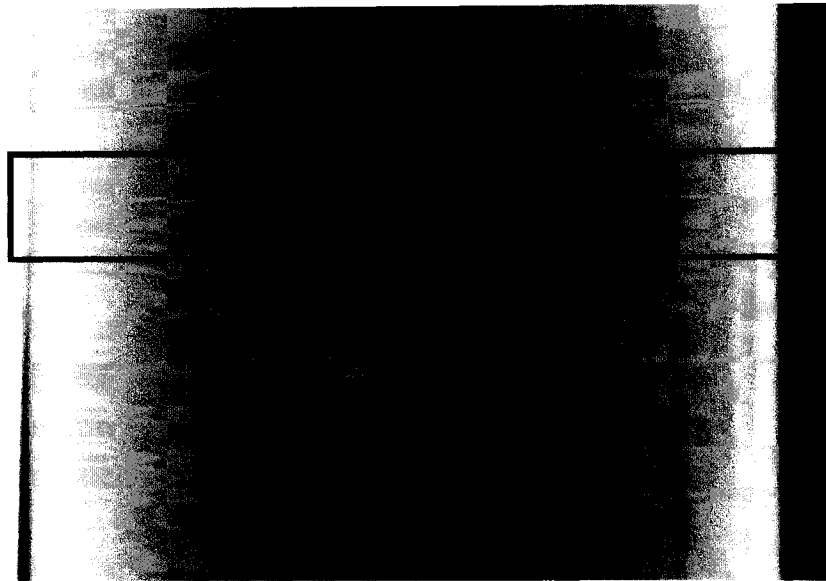


Figure 7.26 : Radiographie de corrosion localisée par abrasion

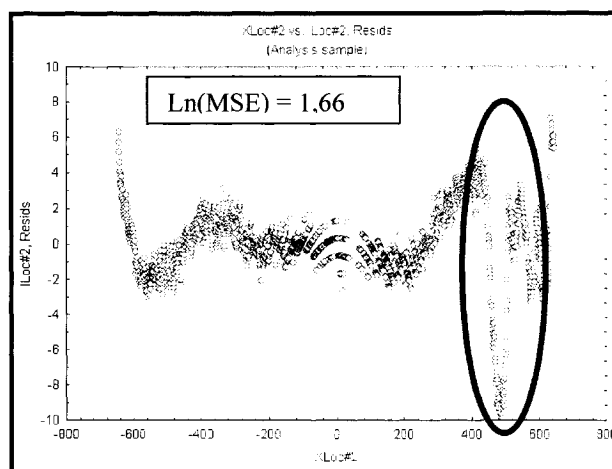


Figure 7.27 : Résidus de corrosion localisée par abrasion

Les résidus bruts de la figure 7.27 montre que le défaut n'influence pas le modèle global, car la tendance est très similaire à ce qui a été observé tout au long de ce travail. La présence de zones attaquée est aussi bien visible (entourée en rouge). Le logarithme de résidu moyen est de 1,66, ce qui classerait cette conduite dans la catégorie de la corrosion généralisée. D'autres critères (autre que le MSE) devront donc être étudiés afin de bien représenter l'état des conduites et de produire un indice de sévérité approprié. Des travaux supplémentaires doivent donc être effectuées dans cette direction.

8 CONCLUSION

Le but de ce projet était de fournir une méthodologie qui va pouvoir permettre le calcul d'indices de sévérité de la corrosion par l'étude de morphologies de mécanismes de dégradation visibles au niveau de fonds de radiographies. Ce but a été atteint, car l'étude qui a été réalisée dans ce projet montre bien qu'il est possible d'utiliser des résidus provenant de modélisation polynomiales de degrés 4 afin de caractériser l'état de conduites corrodées. L'utilisation des résidus élimine tout d'abord l'influence de nombreux paramètres liés aux méthodes de radiographies. En effet, les essais réalisés dans ce travail ont montré que les paramètres de positionnement et de force de source n'influencent pas significativement les résidus des modèles de fonds d'images. La méthode d'analyse permet donc l'utilisation de techniques de radiographies classiques, qui rendent impossible le positionnement précis des sources. De plus la corrosion s'est avérée être la variable qui influence le plus les résidus. L'utilisation de ces derniers est donc très prometteuse.

Néanmoins, cette méthode de caractérisation de fonds d'images n'est pas parfaite. Le modèle, qui représente mal les données, est dépendant de la géométrie des conduites analysées ainsi que du degré de noircissement des films. Les essais réalisés dans ce travail ont montré que ces dépendances pouvaient générer de mauvais classements des mécanismes de corrosion. De telles erreurs pourraient donc donner lieu à des calculs inadéquats des indices de sévérités. D'autres travaux de recherche ont cependant été suggérés afin de pallier ce problème.

En somme, les modèles d'analyses de fonds d'images proposés dans ce travail ne sont pas parfaits. Ils nécessitent des améliorations afin d'être intégrés à un protocole d'analyse de conduites industriel en service. De plus, il est nécessaire d'inclure d'autres caractéristiques que les MSE afin de produire un protocole d'analyse de fonds d'images adéquat. Toutefois les méthodes proposées dans ce travail constituent de solides bases qui vont sans aucun doute permettre de donner naissance à un protocole de reconnaissance de corrosion très puissant qui, à son tour, va permettre le calcul d'indices de sévérité de corrosion.

9 BIBLIOGRAPHIE

1. ALFONSSON, E. , COATES, G., OLSSON, J. 1999. "Stainless Steels for the Hydrometallurgical Industry". *14th International Corrosion Congress (ICC)* . Kelvin : Corrosion Institute of Southern Africa.
2. ASM International, Handbook Committee . 1990-. *ASM handbook*. Materials Park, OH : ASM International. v. <1-8, 18-21> p.
3. ASTM Standards 2004a. *Design Manufacture and Material Grouping Classification of Wire Image Quality Indicators (IQI) Used in Radiology*. Philadelphie : American Society for Testing and Materials. 14 p., Norme américaine concernant la radiographie industrielle E747-04
4. ASTM Standards 2002a. *Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data*. Philadelphie : American Society for Testing and Materials. 14 p., Norme américaine concernant la corrosion G16-95
5. ASTM Standards 2002b. *Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*. Philadelphie : American Society for Testing and Materials. 6 p., Norme américaine concernant la corrosion G46-94
6. ASTM Standards 2004b. *Standard Guide for Radiographic Examination*. Philadelphie : American Society for Testing and Materials. 13 p., Norme américaine concernant la radiographie industrielle E94-04
7. ASTM Standards 2002c. *Standard Practice for Exposure of Metals and Alloys by Alternate Immersion in Neutral 3.5 % Sodium Chloride Solution*. Philadelphie : American Society for Testing and Materials. 4 p., Norme américaine concernant la corrosion G44-99

8. ASTM Standards 2002d. *Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing*. Philadelphie : American Society for Testing and Materials. 6 p., Norme américaine concernant la corrosion G85-98
9. ASTM Standards 2004c. *Standard Practice for Radiographic Examination* Philadelphie. 14 p., Norme Norme américaine concernant la radiographie industrielle E1742-00
10. ASTM Standards 2004d. *Standard Test Method for Classification of Film Systems for Industrial Radiography*. Philadelphie : American Society for Testing and Materials. 6 p., Norme américaine concernant la radiographie industrielle E1815-96
11. ASTM Standards 2002e. *Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution*. Philadelphie : American Society for Testing and Materials. 9 p., Norme américaine concernant la corrosion G48-00
12. BARRINGER, P. 2001. Problem Of The Month : Heat Exchanger IRIS Wall Thickness and Gumbel Smallest Distributions . [En ligne]. <http://www.barringer1.com/mar01prb.htm> (Page consultée le 2 juin 2005)
13. BARRINGER, P. 1997a. Problem Of The Month : Pipe Wall Thickness and Risk Based Inspection. [En ligne]. <http://www.barringer1.com/jun97prb.htm> (Page consultée le 2 juin 2005)
14. BARRINGER, P. 1997b. Problem Of The Month : Tank Bottom Corrosion. [En ligne]. <http://www.barringer1.com/apr97prb.htm> (Page consultée le 2 juin 2005)

15. BIRD, A.F. 2001. "Corrosion Detection Interpretation and Repairs of Carbon Steel Pipelines Utilizing Information Generated by an Ultrasonic Intelligent Vehicle". *Corrosion 2001*. houston, Texas : NACE. P. 016341-0163439.
16. BOYER, K.L., OZGUNER, T. 2001. "Robust Online Detection of Pipeline Corrosion from Range Data". *Machine Vision and Application* . 12 : 6. 291-304.
17. BRUBAKER, S.K. 1987. "Corrosion by Sulfuric Acid". *Corrosion*. Sous la direction de ASM International, Handbook Committee. Materials Park, Ohio : ASM International.
18. CHENG, Y.F., WILMOTT, M., LUO, J.L. 1999. "The Role of Chloride Ions in Pitting of Carbon Steel Studied by the Statistical Analysis of Electrochemical Noise". *Applied Surface Science*. 152 : 3. 161-168.
19. CROOKS, R.D. 1987. "Corrosion by Nitric Acid". *Corrosion*. Sous la direction de ASM international, Handbook Committee. Materials Park, Ohio : ASM International.
20. CROUCH, A.E. , SMITH, M.Q. 2001. "In-Line Measurement Resolution and the Calculation of Remaining Pipe Strength". *Corrosion 2001*. Houston, Texas : NACE. P. 016231-0162326.
21. DAWSON, J., RACE, J., PEET, S., KRISHNAMURTHY, R. 2001. "Pipeline Corrosion Management ". *Corrosion 2001*. Houston, Texas : NACE. P. 016271-0162715.
22. DE JESUS MIRANDA, C.A., NETO, M.M. 2002. "Structural Integrity Assessment of Steam Generator Tubes using a New EPRI Statistical Approach". *10th International Conference on Nuclear Engineering* . New York : ASME. P. 347-353.

23. DIETER, L. 1997. *Traité des matériaux, Corrosion et chimie de surfaces des métaux*. 1st ed. Oxford : Alden Press. 553 p.
24. EL OUAFI, A. , ABED, Y., HAMMOUTI, B., KERTIT, S. 2001. "Effect of Acidity Level Ro(H) on the Corrosion of Steel in Concentrated HCL Solutions". *Annales de Chimie, Science des Matériaux*. 26 : 5. 79-84.
25. FLAKS, V.Ya. 1973. "Statistical Model of Size Distribution of Pittings during Atmospheric Corrosion of Aluminium Alloys". *Zashchita Metallov*. 9 : 4. 443-446.
26. FORLI, O., PETTERSEN, B. 1985. "The Performance of Conventional Ultrasonic and Radiographic Weld Examination". *British Journal of NDT*. 27 : 6. 354-366.
27. FRINI, N., EL MAAOUI, M. 1992. "Cinétique de la dépassiation d'un acier 17-8 par des solutions de H_2SO_4 ". *Journal de la Société Chimique de Tunisie*. 3:4. 233-240.
28. FUJIMOTO, S. , SHIBATA, T., MINAMIDA, M., UDAKA, S. 1994. "A Statistical Evaluation of Crevice Corrosion on Type 304 Stainless Steel". *Corrosion Science*. 36 : 9. 1575-1583.
29. GERRIT, M., BUCCHEIM, P.E. 2001. "An Overview of API RP 579 Fitness For Service and the Role of Corrosion/Material Engineers". *Corrosion 2001*. Houston, texas : NACE. P. 015211-0152117.
30. HALLEN, J.M., CALEYO, F., ALFONSO, L., GONZALEZ, J.L., PÉREZ-BARUCH, E. 2004. "Statistical Calibration of Pipeline In-line Inspection Data". *16th World Conference on Nondestructive Testing*. Montréal : Canadian Institute for Non-Destructive Evaluation . P. TS4.17.2.

31. HARLOW, D.G. , WEI, R.P. 1998. "A Probability Model for the Growth of Corrosion Pits in Aluminium Alloys Induced by Constituent Particles". *Engineering Fracture Mechanics*. 59 : 3. 305-325.
32. ISO 2004a. *Classes de qualité d'image pour des métaux*. Genève : Organisation Internationale de Normalisation. 12 p., Norme ISO concernant les techniques radiographiques 19232-3 : 2004(F)
33. ISO 2004b. *Évaluation expérimentale des indices de qualité d'image et des tables de qualité d'image*. Genève : Organisation Internationale de Normalisation. 5 p., Norme ISO concernant les techniques radiographiques 19232-4 : 2004(F)
34. ISO 2004c. *Indicateurs de qualité d'images (à fils) –Détermination de l'indice de qualité d'image*. Genève : Organisation Internationale de Normalisation. 7 p., Norme ISO concernant les techniques radiographiques 19232-1 : 2004(F)
35. ISO 2004d. *Indicateurs de qualité d'images (à trous et à gradins) –Détermination de l'indice de qualité d'image*. Genève : Organisation Internationale de Normalisation. 7 p., Norme ISO concernant les techniques radiographiques 19232-2 : 2004(F)
36. IVES, M.B., KISH, J.R., RODDA, J.R. 1995. "Passivity of Silicon-Containing Austenitic Stainless Steel in Concentrated Sulphuric Acid". *Materials Science Forum*. 185-188:887-896.
37. KANE, R.D., CAYARD, M.S., SRINIVASAN, S. 1998. "Prediction and Assessment of Corrosion in Industrial Operations". *CORCON 97*. Amsterdam : Elsevier Science. P. 128-139.

38. KELLY, R.G., SCULLY, J.R., ALTYNNOVA, M.M., PEELER, D.T. 2001. "Combining Probabilistic and Database Approaches to the Prediction of Corrosion Damage in Aging Aircraft". 5th Joint FAA/DoD/NASA Conference on Aging Aircraft (Aging Aircraft 2001). [En ligne]. http://www.jcaa.us/AA_Conference_2001/Papers/1A_3.pdf (page consultée le 3 juin 2005)
39. KIRCHHEIM, R., HEINE, B., FISCHMEISTER, H., HOFMANN, S., KNOTE, H., STOLZ, U. 1989. "The Passivity of Iron-Chromium Alloys". *Corrosion Science*. 29:7. 899-917.
40. KUCHUMOV, G.V., YASHKIN, A.V., SHATIN, V.E., SHALYMINOV, V.V., PODREZ, L.P. 1978. "Efficiency of Various Methods for the Nondestructive Testing of Welded Pipe Joints". *Soviet Journal of Nondestructive Testing* . 14 : 4. 364-365.
41. LAYCOCK, P.J., COTTIS, R.A., SCARF, P.A. 1990. "Extrapolation of Extreme Pit Depths in Space and Time". *Journal of the Electrochemical Society* . 137 : 1. 64-69.
42. LAYCOCK, P.J., SCARF, P.A. 1993. "Exceedances, Extremes, Extrapolation and Order Statistics for Pits, Pitting and other Localized Corrosion Phenomena ". *Corrosion Science*. 36 : 1. 135-145.
43. LAYLOCK, N.J., MOAYED, M.H., NEWMAN, R.C. 1996. "Prediction of Pitting Potentials and Critical Pitting Temperature". *Critical Factors in Localized Corrosion II*. Pennington : Electrochemical Society. P. 68-78.

44. LEE, S.S., JANG, B.G. 2001. "Thickness Evaluation of Pipes using Density Profile on Radiograph ". *10th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing* (10th A-PCNDT 2001). [En ligne].
<http://www.ndt.net/article/apcndt01/papers/1209/1209.htm> (page consultée le 3 juin 2005)
45. MAGAGNIN, L. , SALVAGO, G. 2001. "Statistical Evaluation of Localized Corrosion for Stainless Steels Ranking". *Corrosion Reviews*. 19 : 3-4. 347-369.
46. MARTINS, M. 1996. "Advanced Maintenance Surveillance System (AMASS) for Equipment Operating in Hostile Environments". *Insight*. 38 : 12. 868-871.
47. MASON, R.L., GUNST, R.F., HESS, J.L. 2003. *Statistical Design and Analysis of Experiments with Application to Engineering and Science*. 2nd ed. Hoboken : Wiley Interscience. 728 p.
48. MONIZ, B.J., POLLOCK, W.I. 1986. "Materials of Construction for Sulfuric Acid ". *International Process Industries Corrosion Seminar*. Houston : NACE. P. 243-258.
49. MONTGOMERY, D.C. 2001. *Design and Analysis of Experiments*. 5th ed. New-York : John Wiley and Sons. 684 p.
50. NATESAN, M., VENKATACHARI, S., VENKATAKRISHNA, I. 1993. "Mechanism of Corrosion of Mild Steel In sulfuric Acid". *Bulletin of Electrochemistry*. 9:8-10. 403-406.
51. NAUD, P., CHALIFOUR, A., DUBÉ, Y., BOCHU, M. 2004. "Computer vision applied to corrosion evaluation on pipe radiographs". Rapport interne. 16p.

52. NELSON, J.K. 1987. "Corrosion by Alkalies and Hypochlorite". *Corrosion*. Sous la direction de ASM International, Handbook Committee. Materials Park, Ohio : ASM International.
53. NETER, M., KUTNER, C., NACHTSHEIM, W.L. 2005. *Applied Linear Statistical Models*. 5th ed. Boston : McGraw-Hill Irwin. 1396 p.
54. NORMAND, B., PIERRE, A., PAGETTI, J. 1995. "Electrochemical and Surface Studies of the Passive Layers Grown on Sputter-Deposited Nitrogen-Stainless Steel Alloys in 1M H₂SO₄ Solution". *Corrosion Science*. 37:10. 1537-1549.
55. ONG, P.S., PATEL, V., BALASUBRAMANYAN, A. 1997. "Quantitative Characterization of Corrosion Under Insulation ". *Journal of Nondestructive Evaluation*. 16 : 3. 135-146.
56. OSTLE, B., TURNER, K.V., HICKS, C.R., MCEL RATH, G.W. 2001. *Engineering Statistics The Industrial Experience*. Pacific Grove, CA : Thomson Learning. 586 p.
57. PRZEWLOCKA, H., BALA, H. 1981. "Corrosion of Carbon Steels in Mechanically Stirred Solutions 2.0M H₂SO₄". *NACE*. 37:7. 407-411.
58. PUGLISI, F., HAY, D.R., MUSTAFA, V. 1979. "A system Approach to NDT Inspection Optimization". *Ninth World Conference on Non-Destructive Testing*. Port Washington, N.Y. PennWell Publication Company.
59. REVIE, R.W., UHLIG, H.H., UHLIG, H.H. 2000. *Uhlig's corrosion handbook*. New York : Wiley. xxxvi, 1302 p.
60. ROJO, J., BRONSON, A. 1993. "Estimation of Survival Probabilities in Pitting Corrosion Experiments". *Corrosion* 92. Houston : NACE. P. 226-1-226-9.

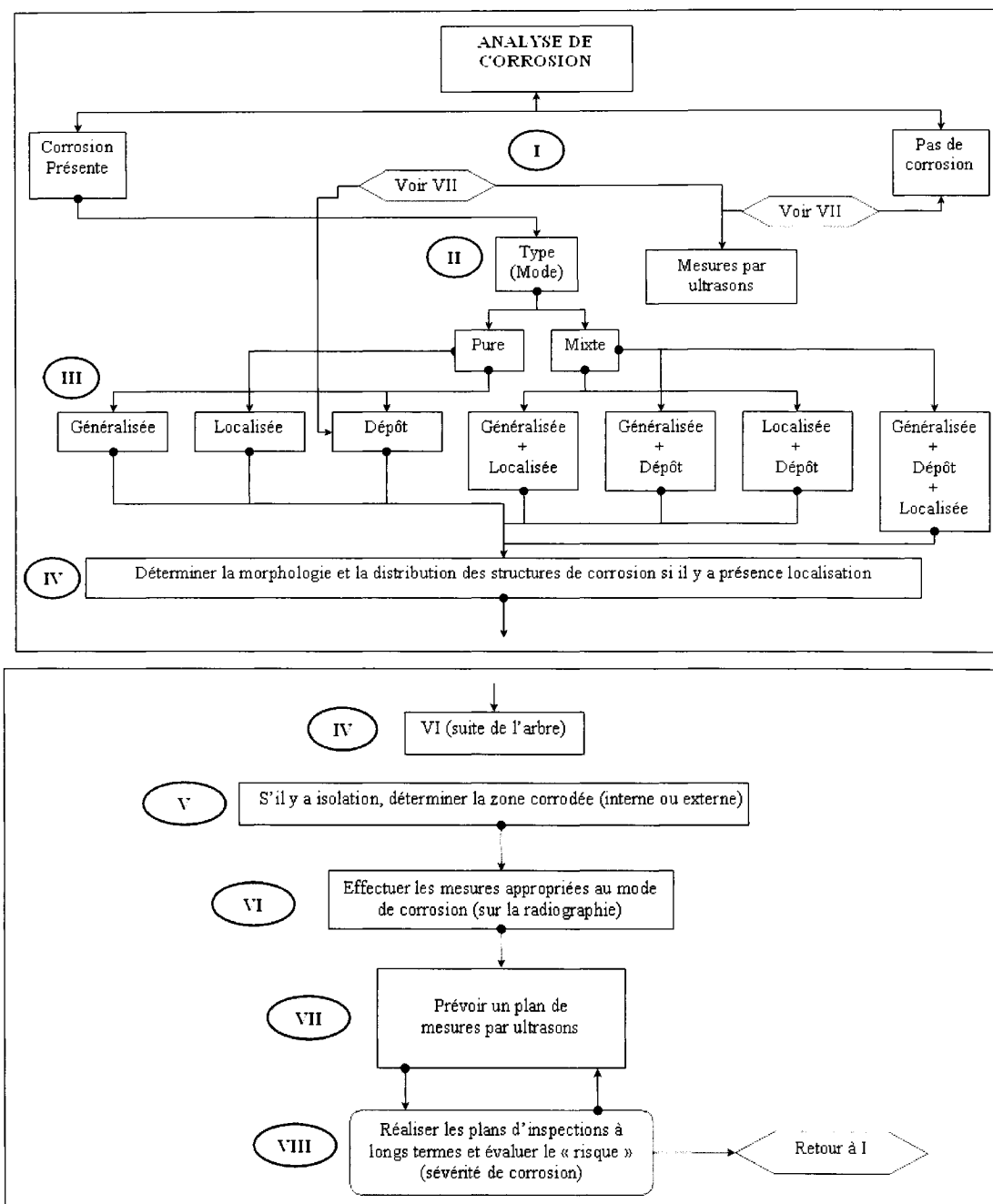
61. RUAULT, P.A. 1991. *Radiologie industrielle Tome 1*. Paris : Publication de la soudure autogène. 394 p.
62. RUST, S.W., JOHNSON, E.R. 2001. "Statistical method for Identifying Active Corrosion Based on Data from Multiple In-Line Inspection Runs". *Corrosion* 2001. Texas : NACE. P. 01622-2-01622-9.
63. SALVAGO, G., FUMAGALLI, G., SINIGAGLIA, D. 1983a. "The Corrosion Behavior of AISI 304L Stainless Steel in 0,1 M HCl at Room Temperature-II. The effect of Cold Working". *Corrosion Science*. 23 : 5. 515-523.
64. SALVAGO, G., FUMAGALLI, G., SINIGAGLIA, D. 1983b. "The Corrosion Behaviour of AISI 304L Stainless Steel in 0.1 M HCl at Room Temperature". *Corrosion Science*. 23 : 5. 507-514.
65. SALVAGO, G., MAGAGNIN, L., BESTETTI, M. 2002. "Unified Approach to Localized and General Corrosion of Stainless Steels". *Electrochimica Acta*. 47 : 11. 1787-1793.
66. SARVESWARAN, V., SMITH, J.W., BLOCKLEY, D.I. 1998. "Reliability of Corrosion-Damaged Steel Structures using Interval Probability Theory". *Structural Safety*. 20 : 237-255.
67. SCHUMM, A., BREMNES, Ø., CHASSIGNOLE, B. 2004. "Numerical Simulation of Radiographic inspection: Fast and Realistic Results even for Thick Components". *16th World Conference on Nondestructive Testing*. Montréal : Canadian Institute for Non-Destructive Evaluation . P. TS4.7.2.
68. SHIBATA, T. 2000. "Corrosion probability and Statistical Evaluation of Corrosion Data". *Uhlig's Corrosion Handbook*. Sous la direction de W. REVIE, H.H. UHLIG. New York : John Wiley & Sons. P. 367-391.

69. SPENCER, F.W. 2001. "Estimating Probability of Detection Curves from Regression Data". *Materials Evaluation*. 59 : 7. 866-870.
70. STAEHLE, R.W. 2000. "Lifetime Prediction of Materials in Environments". *Uhlig's Corrosion Handbook*. Sous la direction de R.W. REVIE, H.H. UHLIG. New-York : John Wiley & Sons. P. 27-84.
71. STAEHLE, R.W., GORMAN, J.A., STAVROPOULOS, K.D., WELTY, C.S.Jr. 1991. "Corrosion of Tubing in Steam Generators of Pressurized Water Reactors". *Life Prediction of Corrodible Structures*. Houston, Texas : NACE. P. 1374-1439.
72. STRUTT, J.E. , NICHOLLS, J.R., BARBIER, B. 1985. "The Prediction of Corrosion by Statistical Analysis of Corrosion Profiles". *Corrosion Science*. 25 : 5. 305-315.
73. SUMMITT, R., FINK, F.T. 1982. "The USAF Corrosion Testing Program and a Corrosion Severity Index Algorithm". *Atmospheric Corrosion*. Somerset : John Wiley & Sons. P. 245-263.
74. TOW, D.M., REUTER, W.G. 1998. "Probabilistic Model for Pressure Vessel Reliability Incorporating Fracture Mechanics and Nondestructive Examination". *Nondestructive Evaluation of Utilities and Pipelines II*. The International Society for Optical Engineering. 3398, P. 168-176.
75. TSUJIKAWA, S., OKAYAMA, S. 1990. "Repassivation method to Determine Critical Condition in Terms of Electrode Potential, Temperature and NaCl Concentration to Predict Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels ". *Corrosion Science*. 31 : 441-446.

76. VAJO, J.J., WEI, R., PHELPS, A.C., REINER, L., HERRERA, G.A., CERVANTES, O. et al. 2003. "Application of Extreme Value Analysis to Crevice Corrosion". *Corrosion Science*. 45 : 3. 497-509.
77. VYAS, B., HANSSON, I.L.H. 1990. "The Cavitation Erosion-Corrosion of Stainless Steel". *Corrosion Science*. 30 : 8/9. 761-770.
78. WILLIAMS, D.E., WESTCOTT, C., FLEISCHMANN, M. 1984. "Studies fo the Initiation of Pitting Corrosion on Stainless Steels". *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* . 180 : 1-2. 549-564.
79. ZSCHERPEL, U., EINAV, I., INFANZON, S., ZIRNHELT, J. 2004. "Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits : IAEA Co-Ordinated Research Project on Large Diameter Steel Pipes". *16th World Conference on Nondestrcutive Testing*. Montréal : Canadian Institute for Non-Destructive Evaluation . P.TS4.16.2

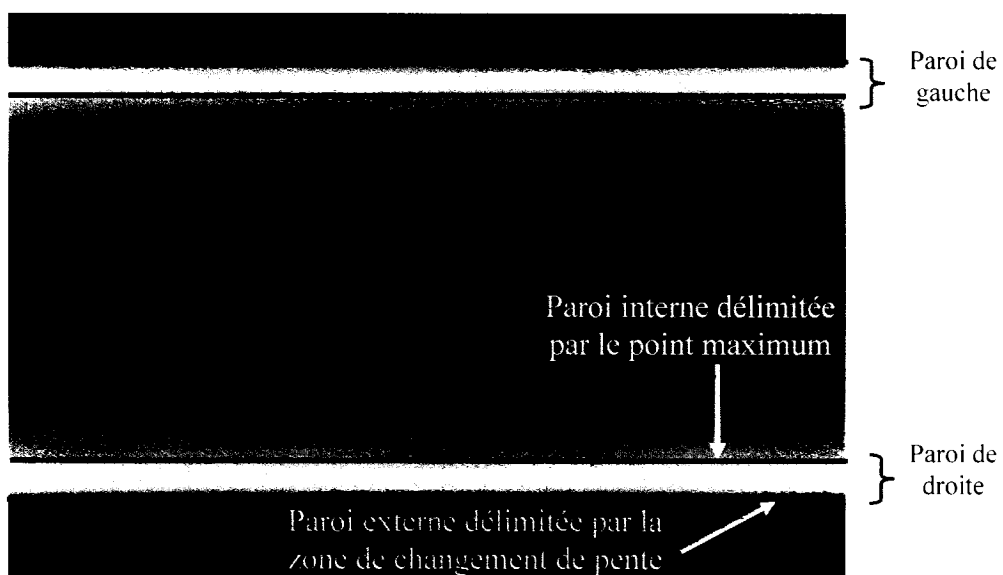
ANNEXE 1

Vision globale du logiciel Corroplus



ANNEXE 2

Délimitations des zones d'une radiographie de section droite

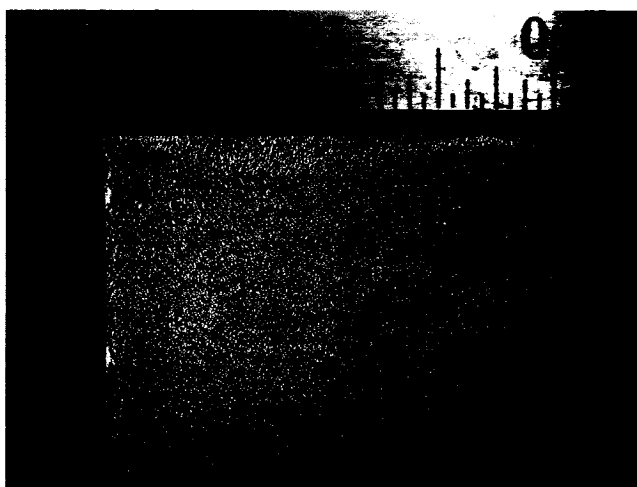


ANNEXE 3

Échantillons exposés à l'acide sulfurique 15 et 30% volumique



État initial typique



État exposé typique (solution 30%)



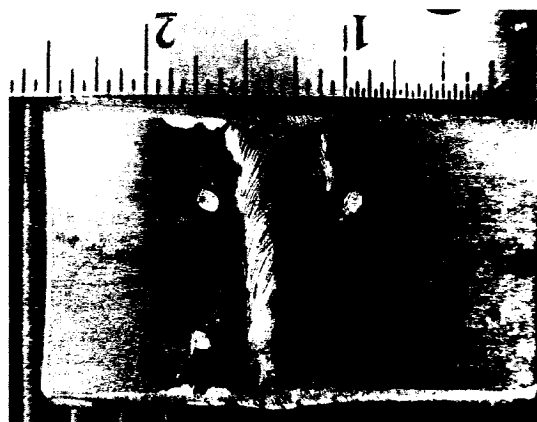
État exposé typique (solution 15%)

ANNEXE 4

Échantillons exposés à l'acide sulfurique 25% volumique



État de surface initial, échantillon AC SA



État de surface initial, échantillon AC SC



État de surface initial, échantillon AC SE



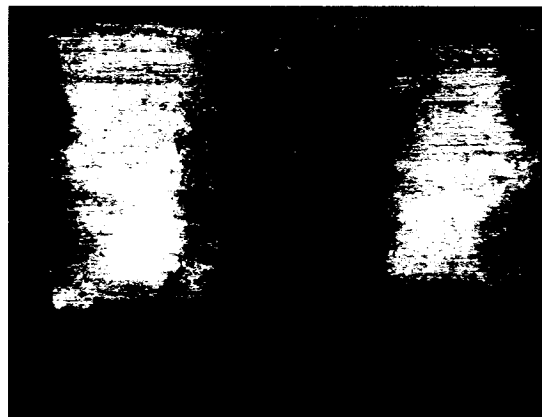
État de surface initial, échantillon AC SSH



État de surface final, échantillon AC SA
(intérieur)



État de surface final, échantillon AC SA
(extérieur)



État de surface final, échantillon AC SE
(intérieur)



État de surface final, échantillon AC SE
(extérieur)



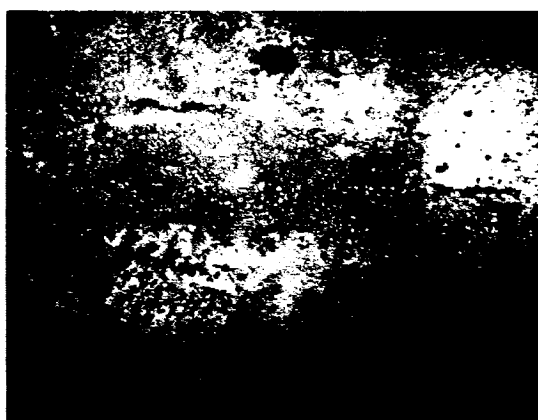
État de surface final, échantillon AC SC
(intérieur)



État de surface final, échantillon AC SC
(extérieur)



État de surface final, échantillon AC SSH
(intérieur)



État de surface final, échantillon AC SSH
(extérieur)

ANNEXE 5

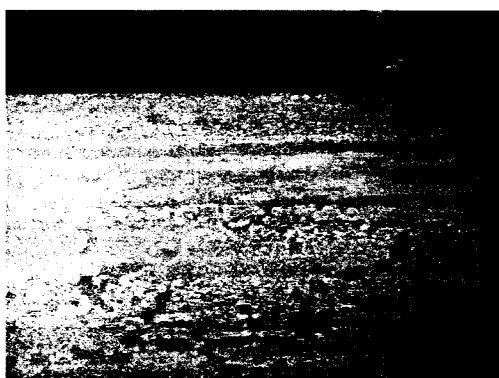
Échantillons exposés aux diverses solutions contenant des chlorures



Échantillon#1



Échantillon#2



Échantillon#3



Échantillon#4



Échantillon#5



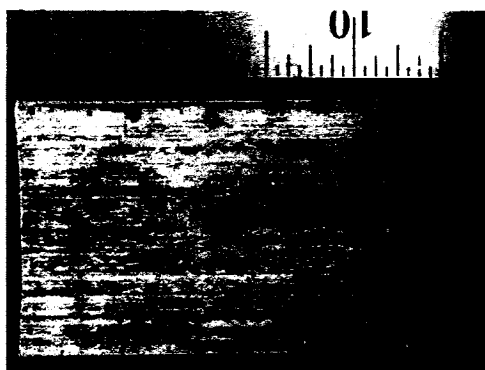
Échantillon#6



Échantillon#7



Échantillon#8



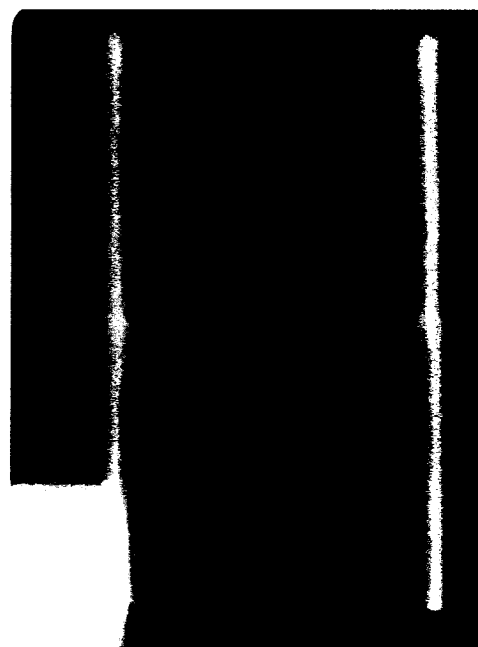
Échantillon#9

ANNEXE 6

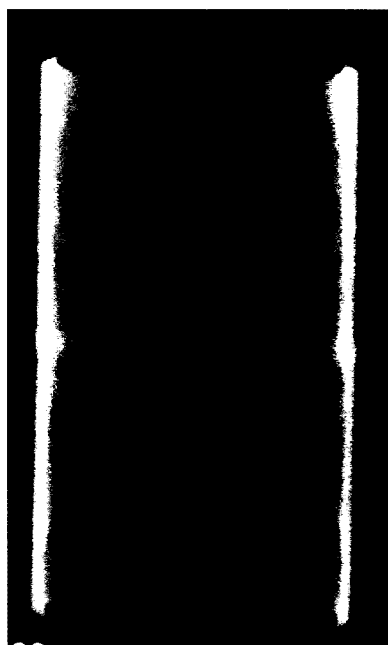
Tuyaux exposées 56 jours à l'acide sulfurique 50% volumique



État initial

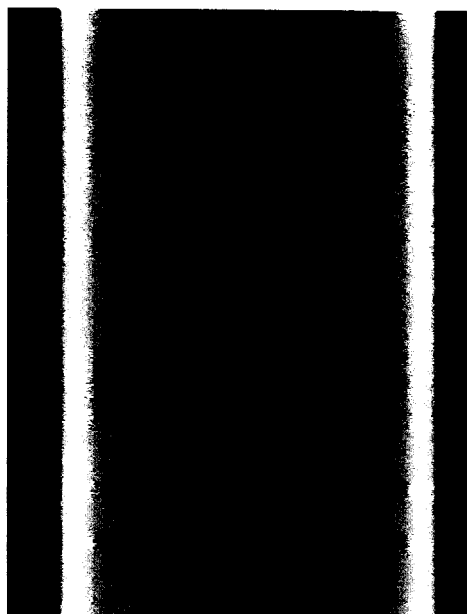


Exposé 28 jours

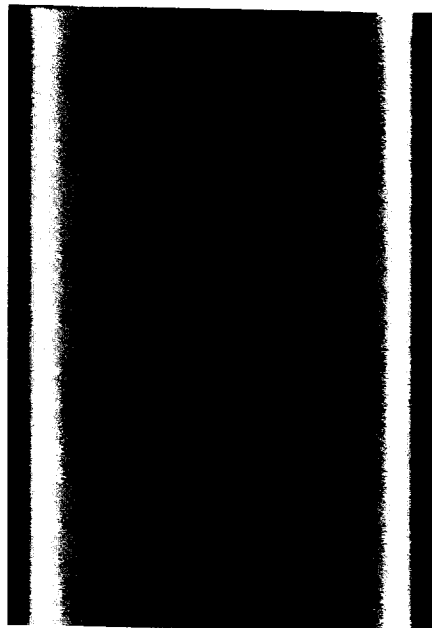


Exposé 56 jours

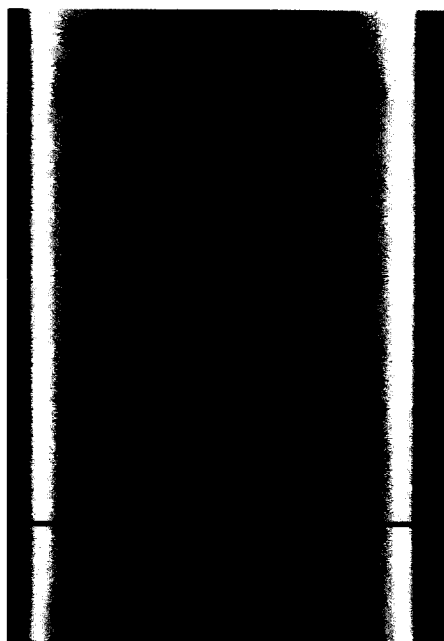
ANNEXE 7
Trois radiographies analysées



T1-F50-0°-A#1-I#1



T1-F50-90°-A#1-I#1



T2-F50-0°-A#1-I#2

ANNEXE 8

Résultats des essais du DOE

Résultats de la matrice A

Psource	Type Film	Delta X	Delta Y	Delta Z	Delta t	NC/C	No	Résultats (MSE)
MAX	F80	-5 Po	0 Po	15 Po	0 Sec	C Loc	MA1	8,80
MIN	F80	-5 Po	-5 Po	10 Po	10 Secs	C Loc	MA2	6,13
MIN	F50	-5 Po	-5 Po	0 Po	0 Sec	NC	MA3	0,86
MIN	F50	0 Po	0 Po	10 Po	10 Secs	C Gen	MA4	2,02
MAX	F100	-5 Po	5 Po	10 Po	15 Secs	NC	MA5	1,78
MIN	F100	5 Po	-5 Po	15 Po	10 Secs	NC	MA6	0,98
MAX	F80	5 Po	-5 Po	10 Po	15 Secs	C Gen	MA7	2,80
MAX	F50	5 Po	0 Po	10 Po	0 Sec	NC	MA8	0,58
MIN	F80	5 Po	5 Po	0 Po	0 Sec	C Gen	MA9	2,63
MAX	F50	0 Po	-5 Po	0 Po	15 Secs	C Loc	MA10	7,71
MAX	F80	0 Po	5 Po	0 Po	10 Secs	NC	MA11	1,66
MIN	F80	0 Po	0 Po	15 Po	15 Secs	NC	MA12	1,56
MIN	F50	5 Po	5 Po	15 Po	15 Secs	C Loc	MA13	5,46
MIN	F100	0 Po	5 Po	10 Po	0 Sec	C Loc	MA14	5,02
MAX	F100	0 Po	-5 Po	15 Po	0 Sec	C Gen	MA15	2,75
MIN	F100	-5 Po	0 Po	0 Po	15 Secs	C Gen	MA16	2,86
MAX	F100	5 Po	0 Po	0 Po	10 Secs	C Loc	MA17	5,54
MAX	F50	-5 Po	5 Po	15 Po	10 Secs	C Gen	MA18	2,00

Résultats de la matrice B

Psource	Type Film	Delta X	Delta Y	Delta Z¹	Delta t	NC/C	No	Résultats (MSE)
MAX	F100	5 Po	0 Po	0 Po	10 Secs	C Loc	MB1	5,78
MAX	F80	0 Po	5 Po	0 Po	10 Secs	NC	MB2	1,40
MIN	F50	-5 Po	-5 Po	0 Po	0 Sec	NC	MB3	0,75
MIN	F80	-5 Po	-5 Po	10 Po	10 Secs	C Loc	MB4	6,39
MAX	F50	-5 Po	5 Po	15 Po	10 Secs	C Gen	MB5	1,86
MAX	F50	5 Po	0 Po	10 Po	0 Sec	NC	MB6	0,62
MIN	F50	0 Po	0 Po	10 Po	10 Secs	C Gen	MB7	2,37
MIN	F100	-5 Po	0 Po	0 Po	15 Secs	C Gen	MB8	2,23
MIN	F80	5 Po	5 Po	0 Po	0 Sec	C Gen	MB9	2,49
MAX	F50	0 Po	-5 Po	0 Po	15 Secs	C Loc	MB10	7,26
MIN	F50	5 Po	5 Po	15 Po	15 Secs	C Loc	MB11	5,21
MIN	F80	0 Po	0 Po	15 Po	15 Secs	NC	MB12	1,50
MIN	F100	0 Po	5 Po	10 Po	0 Sec	C Loc	MB13	6,08
MAX	F80	-5 Po	0 Po	15 Po	0 Sec	C Loc	MB14	6,70
MAX	F80	5 Po	-5 Po	10 Po	15 Secs	C Gen	MB15	3,93
MAX	F100	-5 Po	5 Po	10 Po	15 Secs	NC	MB16	2,17
MAX	F100	0 Po	-5 Po	15 Po	0 Sec	C Gen	MB17	3,13
MIN	F100	5 Po	-5 Po	15 Po	10 Secs	NC	MB18	1,37

Résultats de la matrice C

Psource	Type Film	Delta X	Delta Y	Delta Z	Delta t	NC/C	No	Résultats (MSE)
MAX	F80	0 Po	5 Po	0 Po	10 Secs	NC	MC1	1,66
MIN	F80	-5 Po	-5 Po	10 Po	10 Secs	C Loc	MC2	12,75
MIN	F100	0 Po	5 Po	10 Po	0 Sec	C Loc	MC3	13,13
MIN	F80	5 Po	5 Po	0 Po	0 Sec	C Gen	MC4	4,90
MIN	F50	0 Po	0 Po	10 Po	10 Secs	C Gen	MC5	3,49
MAX	F100	0 Po	-5 Po	15 Po	0 Sec	C Gen	MC6	3,65
MIN	F50	-5 Po	-5 Po	0 Po	0 Sec	NC	MC7	1,40
MAX	F80	5 Po	-5 Po	10 Po	15 Secs	C Gen	MC8	5,42
MIN	F50	5 Po	5 Po	15 Po	15 Secs	C Loc	MC9	11,58
MAX	F50	-5 Po	5 Po	15 Po	10 Secs	C Gen	MC10	4,74
MIN	F100	5 Po	-5 Po	15 Po	10 Secs	NC	MC11	3,07
MAX	F80	-5 Po	0 Po	15 Po	0 Sec	C Loc	MC12	9,15
MAX	F100	-5 Po	5 Po	10 Po	15 Secs	NC	MC13	2,43
MAX	F50	5 Po	0 Po	10 Po	0 Sec	NC	MC14	1,22
MAX	F100	5 Po	0 Po	0 Po	10 Secs	C Loc	MC15	12,46
MAX	F50	0 Po	-5 Po	0 Po	15 Secs	C Loc	MC16	10,23
MIN	F80	0 Po	0 Po	15 Po	15 Secs	NC	MC17	1,84
MIN	F100	-5 Po	0 Po	0 Po	15 Secs	C Gen	MC18	4,87

ANNEXE 9

Données de luminances

Luminances Matrice A	Luminances Matrice B	Luminances Matrice C
177	165	155
181	177	169
177	180	135
174	188	161
151	184	143
186	187	172
171	180	150
187	177	169
175	174	154
177	172	155
179	187	170
175	174	169
177	181	161
185	180	148
175	173	155
180	145	137
170	166	165
183	191	139

ANNEXE 10

Schéma d'une méthodologie idéale

